

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modely stárnutí elektroizolačních systémů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan HVĚZDA**
Osobní číslo: **E18N0018K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Modely stárnutí elektroizolačních systémů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Rozdělte elektroizolační materiály dle různých kritérií.
2. Uveďte diagnostické signály použitelné pro popis degradace elektroizolačních systémů.
3. Navrhněte a proveďte experiment s cílem získání křivky odolnosti působícímu faktoru.
4. Zvolte model životnosti a z naměřených dat identifikujte jeho parametry.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Mentlík V., Trnka P., akol. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, Praha 2011
2. Mentlík a kol., Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Praha 2008
3. Internetové zdroje, firemní materiály, IEEE Xplore databáze
4. Tavner P., Ran L, et al., Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, IET, ISBN 978-0-86341-739-9, 2008
5. James R.E., Su Q., Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment, IET, ISBN 978-0-86341-737-5, 2008.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na popis a rozdělení elektroizolačních materiálů používaných v elektrických strojích, či soustavách. Obsahem práce je popis jednotlivých izolačních materiálů dle skupenství zejména z pohledu elektrických vlastností. Dalším obsahem práce je postup výroby vlastních elektroizolačních vzorků, na které je aplikováno tepelné zatížení za účelem určení změny jednotlivých vlastností z pohledu tepelného stárnutí. K určování stárnutí bylo použito celkem dvanáct vzorků, u nichž byl aplikován jiný postup výroby celkem se třemi odlišnými typy plniva a včetně vzorků neobsahující žádné plnivo. Poslední částí práce je celkové zhodnocení a porovnání měnících se vlastností v závislosti na tepelném stárnutí vyrobených vzorků s odlišným typem plniva včetně zobrazení modelu stárnutí jednoho ze vzorků.

Klíčová slova

Relativní permitivita, izolant, dielektrikum, kapacita, odpor, rezistivita, ztrátový činitel, vzorek, dielektrické ztráty, plnivo, pojivo, pryskyřice, elektroizolační materiál, kompozitní materiál, polarizační index, tepelné stárnutí, elektrická vodivost

Abstract

The diploma thesis is focused on the description and distribution classification of electrical insulating materials which are used in electrical machines and systems. The first part of the thesis deals with profound description of individual insulating materials according to the state of matter, mainly from the aspect of electrical properties. Moreover the thesis describes process of production electrical insulation samples to which a thermal load is applied in order to determine changes in individual properties due to the irreversible deterioration of the materials caused by the thermal aging. A total of twelve samples were used to determine the aging process, while a distinct production methods were used for each of the sample differentiated according to used types of fillers, including samples with no filler at all. The last part of the thesis is devoted to overall evaluation and comparison of changing properties based on thermal aging of produced samples with different types of filler, including presentation of one of the aging model on one of the samples.

Key words

Relative permittivity, insulating material, dielectric, capacity, resistance, resistivity, dissipation factor, sample, dielectric losses, filler, binder, resin, electrical insulation material, composite material, polarization index, thermal aging, electrical conductivity

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16.6.2020

Milan Hvězda

(Nepovinná část)

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Hornakovi, Ph.D. za pomoc při výrobě testovacích vzorků pro měření.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
SEZNAM OBRÁZKŮ	4
SEZNAM TABULEK	5
1 ROZDĚLENÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	6
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ IZOLANTŮ.....	7
1.2 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ.....	8
1.2.1 Elektrická vodivost dielektrik.....	8
1.2.2 Elektrická vodivost plyných izolantů.....	9
1.2.3 Elektrická vodivost kapalných izolantů.....	10
1.2.4 Elektrická vodivost pevných izolantů.....	11
1.2.5 Relativní permitivita a dielektrická polarizace.....	12
1.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ.....	14
1.3.1 Tahové vlastnosti izolantů.....	14
1.3.2 Ohybové vlastnosti izolantů.....	15
1.3.3 Rázová houževnatost.....	15
1.4 TEPELNÉ STÁRNUTÍ.....	16
2 DIAGNOSTICKÉ SIGNÁLY UMOŽŇUJÍCÍ POPIS DEGRADACE MATERIÁLU	18
2.1 ABSORPČNÍ A RESORPČNÍ CHARAKTERISTIKY.....	19
2.2 MĚŘENÍ VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ REZISTIVITY.....	20
2.2.1 Měření vnitřní a povrchové rezistivity voltampérovou metodou.....	21
2.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	23
2.4 POLARIZAČNÍ INDEXY.....	25
2.5 STÁRNUTÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ.....	26
2.5.1 Elektrické stárnutí.....	26
2.5.2 Tepelné stárnutí.....	26
2.5.3 Mechanické stárnutí.....	27
2.5.4 Působení dalších faktorů.....	27
3 VÝROBA KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	28
3.1 POUŽÍVANÁ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU KOMPOZITU.....	28
3.1.1 Systém resin-rich.....	28
3.1.2 Systém VPI (Vacuum Pressure Impregnation).....	29
3.2 MATERIÁLY POUŽITÉ PRO VÝROBU KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU.....	30
3.3 POSTUP PŘI VÝROBĚ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU.....	32
3.3.1 Zvolený postup výroby testovacích vzorků.....	32
4 URČENÍ STÁRNUTÍ IZOLAČNÍHO MATERIÁLU	35
4.1 PROCES TEPELNÝM ZATÍŽENÍM.....	35
4.1.1 Měření povrchové rezistivity voltampérovou metodou.....	37
4.1.2 Absorpční charakteristiky jednotlivých vzorků.....	41
5 MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT	44
5.1 MODEL ŽIVOTNOSTI A ŽIVOTNOSTNÍ KŘIVKA.....	48
6 ZÁVĚR	52

PŘÍLOHA A: KATALOGOVÉ LISTY57

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na porovnání vlastností různých kompozitních materiálů pro použití v elektroizolačních systémech z hlediska tepelného stárnutí a dielektrických ztrát. Jedná se o obsáhlé a stále neprobádané téma důležité pro určení stárnutí daných materiálu pro použití například v motorech. Samotný proces pro určování stárnutí elektroizolačních materiálu není složitý, ale je zapotřebí zvažovat veškeré faktory působící na materiál, které je pro přesné stanovení stárnutí potřeba určovat v reálném čase a za reálných podmínek. Takový postup je nejen nákladný, ale i nereálný z pohledu času. Z tohoto důvodu se využívá určitých zjednodušení za pomoci různých modelů, jenž je dále rozebráno v předkládané práci. Pro porovnání stárnutí různých kompozitních materiálů bylo vyrobeno několik vzorků se stejným typem pojiva, respektive maticí, ale různým typem plniva. Celkem bylo vyrobeno 12 vzorků se třemi typy plniva a pro porovnání i vzorky pouze s čistou pryskyřicí, respektive maticí.

Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá rozdělením elektroizolačních materiálů, druhá uvádí možnost diagnózy jednotlivých materiálů, respektive jejich diagnostické signály pro popis degradace v závislosti na okolních podmínkách. Třetí část diplomové práce se zabývá výrobou elektroizolačních vzorků, které byly dále použity pro měření a porovnání degradace v závislosti na teplotním zatížení. V poslední páté části následuje porovnání a vyhodnocení výsledků vlastností jednotlivých vzorků od počátku až do konce stárnutí.

Seznam symbolů a zkratk

γ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]	.....	konduktivita
ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]	.....	měrný elektrický odpor
S [m^2]	.....	plocha elektrod
h [m}]	.....	tloušťka vzorku
f [Hz}]	.....	frekvence
I [A}]	.....	elektrický proud
I_{SS} [A}]	.....	stejnoseměrný proud
U [V}]	.....	elektrické napětí
U_{SS} [V}]	.....	stejnoseměrné napětí
R [Ω]	.....	izolační odpor, univerzální plynová konstanta
E [$\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$]	.....	intenzita elektrického pole
ϵ_r [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]	.....	relativní permitivita
ϵ [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]	.....	absolutní permitivita materiálu
ϵ_0 [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]	.....	relativní permitivita vakua
τ [h}]	.....	životnost materiálu
$\text{tg } \delta, \text{DF}$	.....	ztrátový činitel
A, B	.....	materiálové konstanty
T [$^{\circ}\text{C}$]	.....	teplota
W_a, E_a [eV}]	.....	aktivační energie
a	.....	konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul
ρ_V [$\Omega \cdot \text{m}$]	.....	vnitřní rezistivita
p_i	.....	polarizační index
i_{15} [A}]	.....	absorpční proud odečtený 15 sekund po přiložení napětí
i_{60} [A}]	.....	absorpční proud odečtený 60 sekund po přiložení napětí
R_X [Ω]	.....	neznámý odpor měřeného materiálu
I_X [A}]	.....	proud protékající měřeným materiálem
I_a [A}]	.....	absorpční proud
I_{aw} [A}]	.....	ztráty v dielektriku
I_{bzp} [A}]	.....	proud odpovídající rychlým bezeztrátovým polarizacím
I_{aj} [A}]	.....	jalová složka
C_X [F}]	.....	měřená kapacita (vzorek)

- C_N [F] normálový kondenzátor
- C_M, C_R [F] nízkonapěťové kondenzátory
- mesh druh plniva ve tvaru pletiva
- VP vzorky s čistou pryskyřicí
- VC vzorky s plnivem typu mikročástice
- VM vzorky s plnivem typu mesh
- VF vzorky s plnivem typu fólie

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: OBECNÉ ROZDĚLENÍ IZOLANTŮ.....	7
OBRÁZEK 2: ZÁVISLOST PROUDU V PLYNNÉM DIELEKTRIKU NA INTENZITĚ VNĚJŠÍHO ELEKTRICKÉHO POLE, PŘEVZATO Z [1]	9
OBRÁZEK 3: ZÁVISLOST PROUDU NA INTENZITĚ VNĚJŠÍHO ELEKTRICKÉHO POLE PRO KAPALNÁ DIELEKTRIKA, PŘEVZATO Z [1]	10
OBRÁZEK 4: ZÁVISLOST PROUDU NA INTENZITĚ VNĚJŠÍHO ELEKTRICKÉHO POLE PRO PEVNÉ IZOLANTY, PŘEVZATO Z [1]	11
OBRÁZEK 5: BLOKOVÉ SCHÉMA VOLTAMPÉROVÉ METODY	21
OBRÁZEK 6: PRŮBĚH PROUDU VZORKEM PO PŘIPOJENÍ NAPĚTÍ PŘEVZATO Z [3]	21
OBRÁZEK 7: ELEKTRODOVÁ USPOŘÁDÁNÍ PRO MĚŘENÍ VNITŘNÍHO A POVRCHOVÉHO ODPORU.	22
OBRÁZEK 8: FÁZOVÝ DIAGRAM REÁLNÉHO DIELEKTRIKA PŘEVZATO Z [3].....	23
OBRÁZEK 9: BLOKOVÉ SCHÉMA AUTOMATICKÉHO MŮSTKU	24
OBRÁZEK 10: STRUKTURNÍ VZOREC EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE NA BÁZI DIANU, PŘEVZATO Z [15].....	30
OBRÁZEK 11: SCHÉMA VYTVRZOVÁNÍ EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE DIAMINEM, PŘEVZATO Z [17].....	31
OBRÁZEK 12: PLNIVO MESH PA6 NMO1000 [19].....	31
OBRÁZEK 13: VAKUOVÁ PUMPA (VLEVO) SPOLU S MAGNETICKOU MÍCHAČKOU (VPRAVO)	33
OBRÁZEK 14: NÁDOBA UMOŽŇUJÍCÍ PŘIPOJENÍ K VAKUOVÉ PUMPĚ	33
OBRÁZEK 15: SILIKONOVÁ ŠABLONA NA TEFLONOVÉ DESTIČCE	34
OBRÁZEK 16: UZEMNĚNÉ VZORKY Z DŮVODU VYBITÍ ELEKTROSTATICKÉHO NAPĚTÍ	35
OBRÁZEK 17: VZORKY UMÍSTĚNÉ V TROUBĚ PO 144 HODINÁCH	36
OBRÁZEK 18: PRŮBĚH ZMĚNY VNITŘNÍ REZISTIVITY MĚŘENÝCH VZORKŮ V ZÁVISLOSTI NA ČASE STRÁVENÉM POD TEPLTNÍM ZATÍŽENÍM.....	40
OBRÁZEK 19: PRŮBĚH ABSORPČNÍCH CHARAKTERISTIK MĚŘENÝCH VZORKŮ S ČISTOU PRYSKYŘICÍ BEZ PLNIVA	41
OBRÁZEK 20: PRŮBĚH ABSORPČNÍCH CHARAKTERISTIK MĚŘENÝCH VZORKŮ S FÓLÍÍ	42
OBRÁZEK 21: PRŮBĚH ABSORPČNÍCH CHARAKTERISTIK MĚŘENÝCH VZORKŮ S PRYSKYŘICÍ	42
OBRÁZEK 22: PRŮBĚH ABSORPČNÍCH CHARAKTERISTIK MĚŘENÝCH VZORKŮ S MESH	43
OBRÁZEK 23: MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ HAEFELY 2830 S TESTOVACÍ BUŇKOU.....	44
OBRÁZEK 24: ZMĚNA ZTRÁTOVÉHO Činitele MĚŘENÝCH VZORKŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPELNÉM ZATÍŽENÍ.....	46
OBRÁZEK 25: ZMĚNA KAPACITY MĚŘENÝCH VZORKŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPELNÉM ZATÍŽENÍ	47
OBRÁZEK 26: ZMĚNA PERMITIVITY MĚŘENÝCH VZORKŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPELNÉM ZATÍŽENÍ.....	48
OBRÁZEK 27: PRŮBĚH ZTRÁTOVÉHO Činitele PRO MATERIÁL S PLNIVEM "MESH" V ZÁVISLOSTI PŘI STÁRNUTÍ NA TŘECH RŮZNÝCH TEPLOTÁCH.....	49
OBRÁZEK 28: STANOVENÍ ŽIVOTNOSTNÍ KŘIVKY PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁL S PLNIVEM "MESH"	50

Seznam tabulek

TABULKA 1: RELATIVNÍ PERMITIVITA VYBRANÝCH DIELEKTRIK [4][5]	13
TABULKA 2: PŘEHLED TEPELNÝCH TŘÍD PRO IZOLAČNÍ MATERIÁLY [7].....	17
TABULKA 3: STAV IZOLACE Z POHLEDU POLARIZAČNÍHO INDEXU.....	25
TABULKA 4: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PRVNÍHO MĚŘENÍ	37
TABULKA 5: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA DRUHÉHO MĚŘENÍ.....	37
TABULKA 6: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA TŘETÍHO MĚŘENÍ.....	38
TABULKA 7: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA ČTVRTÉHO MĚŘENÍ	38
TABULKA 8: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PÁTÉHO MĚŘENÍ.....	39
TABULKA 9: POLARIZAČNÍ INDEXY JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ	43
TABULKA 10: PRVNÍ MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT	45
TABULKA 11: DRUHÉ MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT	45
TABULKA 12: TŘETÍ MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT	45
TABULKA 13: ČTVRTÉ MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT	45
TABULKA 14: PÁTÉ MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT.....	46

1 Rozdělení izolačních materiálů

Izolant je materiál v ideálním případě neobsahující žádné volné nosiče náboje. Vzhledem k této skutečnosti tak nevede elektrický proud mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Ideální izolant však v přírodě neexistuje, a tak se používá pouze ke zjednodušení výpočtů. Reálný izolant používaný v praxi obsahuje jen velmi malé množství volných nosičů náboje, a tak nevede téměř žádný elektrický proud. [1]

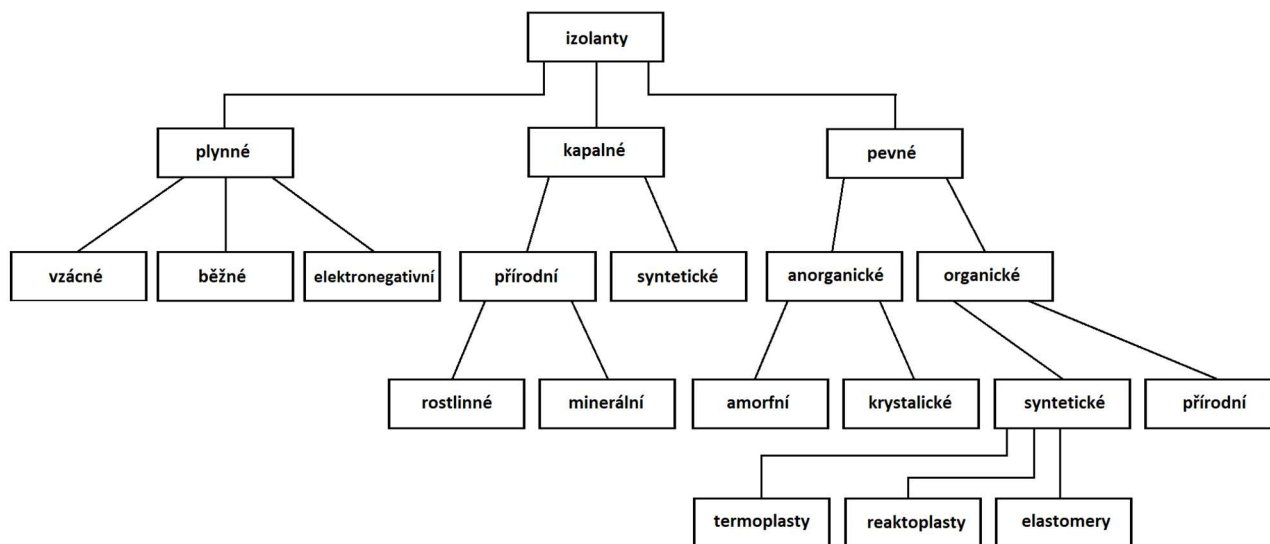
Reálný dobrý izolant vykazuje určité vlastnosti, a to zejména vlastnosti elektrické. Mezi takovéto vlastnosti patří co nejvyšší elektrická pevnost, rezistivita větší než $10^{12}\Omega\cdot\text{m}$, relativní permitivita v řádu jednotek a co nejmenší zkratový činitel. V neposlední řadě je také důležité správně rozlišovat dielektrikum a izolant, protože v praxi je tato skutečnost často zaměňována. Pojem dielektrikum je celkově obecnější než izolant, a proto platí pravidlo, že každý izolant je dielektrikum, ale na každé dielektrikum je izolant. [1]

Mimo již zmíněné elektrické vlastnosti musí izolant splňovat i celou řadu dalších jako jsou vlastnosti mechanické (pružnost, pevnost), fyzikálně-chemické (chemická odolnost, navlhavost) a teplotní (tepelná vodivost, odolnost proti teplu a hoření, teplota tání). [1]

Vzhledem k těmto skutečnostem se tak izolanty dále rozdělují podle dalších kritérií.

1.1 Základní rozdělení izolanů

Obecné rozdělení izolanů začíná skupenstvím, které může být pevné, kapalné, nebo plynné. Dále následuje dělení látek podle jejich původu. Kompletní rozdělení lze vidět v níže zmíněném obrázku.



Obrázek 1: Obecné rozdělení izolanů

Plynné izolační materiály mají ze všech skupenství, ve kterém se může izolan nacházet obecně nejnižší relativní permitivitu. Mezi jejich největší výhodou oproti ostatním skupenství je možnost rovnoměrného vyplnění prostoru a použití ve velmi malých prostorech. Další výhodou je jejich nezávislost dielektrických ztrát na frekvenci, velmi nízké hodnoty konduktivity a možnost regenerovat po přeskočení elektrické energie.

Kapalné izolační materiály nabízí více možností využití jako izolan, kde současně mohou sloužit jako chladicí médium z důvodu dobré tepelné vodivosti. Stejně jako izolanty plynné mohou jednoduše vyplňovat složitější prostory. Jejich výhodou je možnost použití jako impregnace, či výplně tuhých izolanů za účelem zlepšení jejich elektrických vlastností.

Pevné izolační materiály mají nejširší rozdělení, které nabízí různorodé vlastnosti v závislosti na jejich složení a chemické struktuře. Mezi jejich hlavní nevýhodou patří nemožnost umístění do složitějších prostor a chybějící regenerační schopnosti po proražení izolanu elektrickým proudem.

1.2 Elektrické vlastnosti izolantů

1.2.1 Elektrická vodivost dielektrik

Ideální izolant je materiál s nulovou elektrickou vodivostí. Reálný izolant však takové vlastnosti nedosahuje a vykazuje tak nenulovou elektrickou vodivost. [1]

Z hlediska elektrické vodivosti se pro hodnocení materiálů používá měrný elektrický odpor – rezistivita ρ [$\Omega \cdot m$] a měrná elektrická vodivost – konduktivita γ [$S \cdot m^{-1}$]. Na jednotku objemu přepočítaný měrný odpor, či vodivost používáme zejména pro vzájemné porovnání dle vztahu:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} [S \cdot m^{-1}] \quad (1)$$

ρ měrný elektrický odpor
 γ konduktivita [$\Omega \cdot m$]

Pro plochý vzorek materiálu a uvažované homogenní elektrické pole se měrný odpor vyjádří jako:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} [\Omega \cdot m] \quad (2)$$

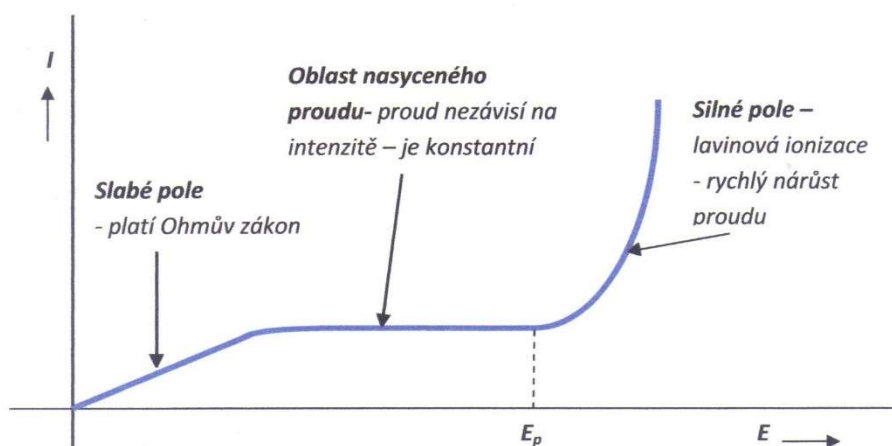
ρ měrný elektrický odpor
 R změřený izolační odpor [Ω]
 S plocha elektrod [m^2]
 h tloušťka vzorku [m]

Okamžitou hodnotu izolačního odporu je třeba spočítat z přiloženého napětí na měřený materiál a z protékajícího proudu materiálem. Jeho změření a výpočet je popsán níže.

Vznik a pohyb volných nosičů je závislý nejen na skupenství látek, ale i na typu nosičů elektrického náboje. Tyto látky jsou tak dle skupenství děleny na pevné, kapalné a plynné, kde jsou rozdíly způsobeny různou vzdáleností částic látek a tím různou intenzitou vzájemného působení. [2]

1.2.2 Elektrická vodivost plyných izolantů

Z důvodu malé koncentrace volných nosičů náboje jsou plyny za standardních podmínek výbornými izolanty. Volné nosiče náboje u plyných izolantů vznikají především působením ionizačních činitelů, jehož vlivem dochází k odtržení jednoho, či více záporných elektronů z neutrálního atomu, a tím vznikne kladný iont. Záporné ionty pak mohou vznikat zachytáváním elektronů na neutrálních atomech. Tento jev se nazývá ionizace plynu, během kterého může dojít k průchodu elektrického proudu plyným izolantem. Jedná se však pouze o dočasnou ztrátu elektroizolační schopnosti. Současně s ionizací a tím způsobem vzniku volných nosičů náboje dochází i k jejich zániku. To je zapříčiněno buď neutralizací volných nosičů náboje na elektrodách a odevzdání jejich energie, nebo rekombinací. Rekombinace nastává, pokud dojde ke srážce dvou nebo více částic opačné polaroty a tím vznikne neutrální částice. [2][1]

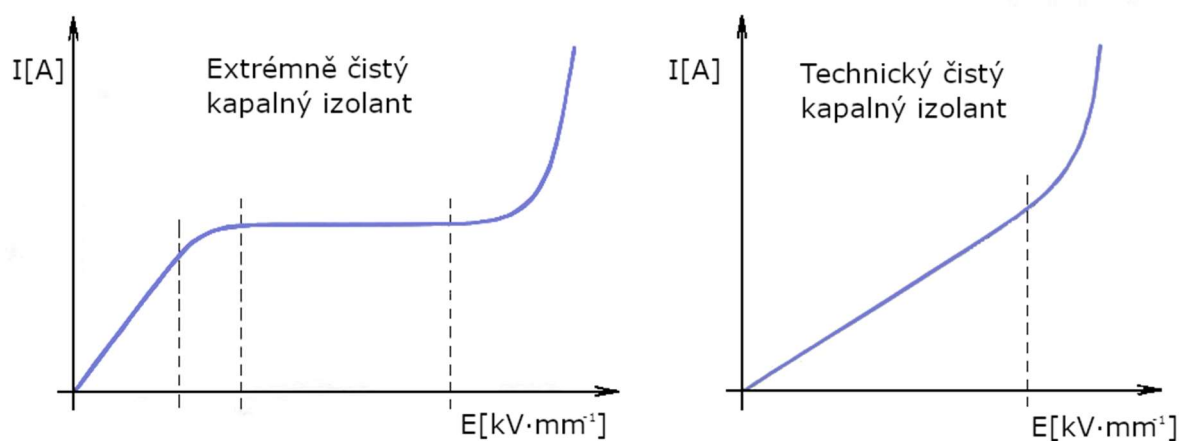


Obrázek 2: Závislost proudu v plyném dielektriku na intenzitě vnějšího elektrického pole, převzato z [1]

1.2.3 Elektrická vodivost kapalných izolantů

Kapalná látka vzniká kondenzací, přesněji změnou skupenství buď z plynného na kapalné, nebo za pomoci tavení z pevného na kapalné. Jejich mezimolekulární vzdálenost je výrazně menší než u plynů. Jednotlivé vzdálenosti jsou úměrné velikosti molekul, a tak je jejich vzájemné ovlivňování a silové působení silnější než v plynech, ale stále slabší než u pevných látek. Kapalné izolanty obsahují ionty příměsí a nečistot, a tak se vyznačují větší hustotou než izolanty plynné. Toto složení výrazně ovlivňuje jejich elektrickou vodivost. Velikostí obsahu nečistot lze kapalné izolanty rozlišit na extrémně čisté kapalné izolanty a technicky čisté kapalné izolanty.

Extrémně čisté kapalné izolanty vznikající pečlivou rafinací a dokonalým odplyněním mají velmi nízkou hodnotu konduktivity z důvodu přítomnosti volných nosičů náboje, které vznikají ionizací, nebo disociací molekul. Naopak technicky čisté izolanty mají velikosti konduktivity o tři až čtyři řády vyšší. Rozdíl mezi těmito dvěma kapalnými izolanty je ten, že pokud dojde k překročení intenzity elektrického pole ve vzduchu s mezní hodnotou blížíící se k $E_K = 1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, tak se začne vytvářet nárazová ionizace, která způsobí prudké zvyšování proudové hustoty. Naopak technicky čisté kapalné izolanty mají průběh sycení podobný, jako plynné izolanty. [2][1]

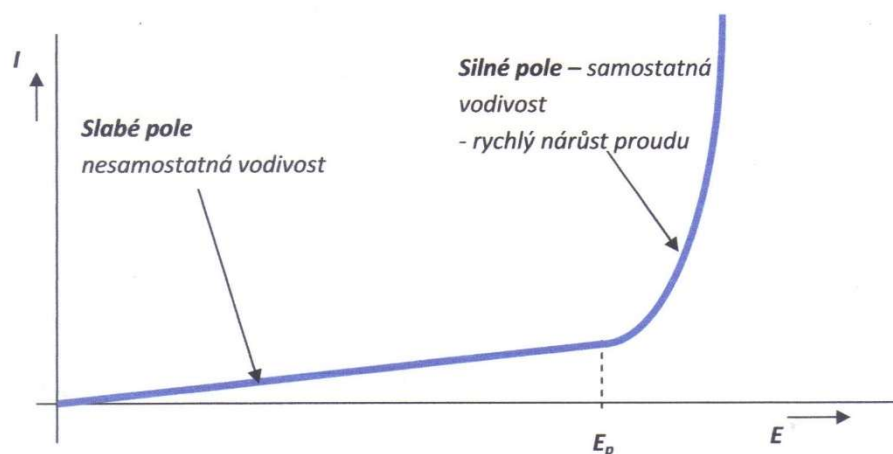


Obrázek 3: Závislost proudu na intenzitě vnějšího elektrického pole pro kapalná dielektrika, převzato z [1]

1.2.4 Elektrická vodivost pevných izolanů

Pevné izolanty mají při normálních podmínkách velmi malou hodnotu konduktivity, která je závislá na složitosti a pestrosti struktury izolantu, dále dělicí na iontové amorfnní a iontové krystalické. Elektrická vodivost pevných izolanů může být buď elektronová, nebo iontová, kde jedna z nich vždy převažuje. V praxi obvykle u používaných pevných izolanů převládá iontová elektrická vodivost. Samotný výpočet elektrické vodivosti u pevných izolanů je poněkud složitější, než u plyných a kapalných, proto je třeba vycházet z určitých zjednodušujících předpokladů o pohybu iontů. [2]

Pevné izolanty mají největší hustotu látky. V porovnání s plynými a kapalnými látkami může proud procházet jak objemem materiálu, tak i po jeho povrchu. Z tohoto důvodu se u pevných izolanů rozlišuje vnitřní i povrchová vodivost. Vnitřní vodivost se podobně jako u kapalin ve slabém elektrickém poli projevuje nevlastní vodivostí od iontů příměsí a přibližně platí Ohmův zákon. V silném elektrickém poli již dochází k vlastní elektronové vodivosti, která se projeví prudkým nárůstem proudu a následným průrazem. Povrchová vodivost pevných izolanů způsobená nečistotami usazujících se na povrchu materiálu je velmi nepříznivá a ohrožuje bezpečný provoz elektrických zařízení. [1]



Obrázek 4: Závislost proudu na intenzitě vnějšího elektrického pole pro pevné izolanty, převzato z [1]

1.2.5 Relativní permitivita a dielektrická polarizace

Relativní neboli poměrná permitivita je měřítkem polarizace dielektrika a udává kolikrát je schopnost polarizace daného materiálu vyšší než schopnost polarizace vakua. Jedná se o bezrozměrnou veličinu označující písmenem ε_r v rozmezí 1 až 10^4 . Veškerá dielektrika mají zpravidla relativní permitivitu vždy větší než 1, což je hodnota, na které začíná například vzduch. Běžná dielektrika však nabývají hodnot $\varepsilon_r = 2 - 300$. Hodnoty vyšší pak spadají pod takzvaná feroelektrika, u kterých velmi snadno dochází k elektrické polarizaci. Relativní permitivita je závislá na druhu dielektrika, na fyzikálních podmínkách, jakými mohou být například teplota, tlak a také na kmitočtu. Je dána jako poměr absolutní permitivity materiálu ε ku permitivitě vakua ε_0 . [1]

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} [-] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon & \text{ absolutní permitivita materiálu } [F \cdot m^{-1}] \\ \varepsilon_0 & \text{ permitivita vakua } = 8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1} \end{aligned}$$

Relativní permitivita přímo souvisí s polarizací dielektrika. Jedná se o proces, u kterého dochází k narušení symetrie elektrických nábojů v atomech dielektrika. Tento proces nastává po vložení dielektrika do elektrického pole. Proces probíhá odlišně u dielektrik polárních, či nepolárních. U nepolárních dielektrik při procesu polarizace dochází ke změně atomů, či molekul působením přitažlivé a odpudivé síly na elektrické dipóly. Tímto dochází k nesymetrickému rozložení částic s elektrickým nábojem uvnitř atomů, či molekul. Naopak polární dielektrika obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole. Jejich směr je tak neuspořádaný a při polarizaci dochází k uspořádání dipólů do jednoho směru. V každém dielektriku dochází k několika druhům polarizace současně, kde každá z nich je, nebo není závislá na některém z okolních vlivů, jako je například teplota, či kmitočet. [1]

Polarizace vznikající působením elektrického pole jsou dále rozděleny podle nosičů náboje podílejících se na mechanismu polarizace. Vzhledem k této skutečnosti se tak polarizace rozdělují na deformační (pružné) a relaxační. Deformační polarizace vzniká při posunu silně vázaných nosičů elektrického náboje. Jedná se o velmi malý posun nosičů náboje, který však výrazně ovlivní velikost relativní permitivity dielektrika z důvodu posunutí velkého množství nosičů. Z důvodu pevné vazby nosičů je ustálení deformační polarizace velmi krátké (obvykle 10^{-16} až 10^{-12} sekund). Pevná vazba má také vliv na odolnost vůči tepelnému pohybu nosičů, tlaku a také frekvenci po vložení dielektrika do elektrického pole. Jedná se tak o bezeztrátovou polarizaci. [3]

Pokud se při polarizaci podílejí slabě vázané nosiče, tak se jedná o polarizaci relaxační. Oproti deformační polarizaci je tento typ polarizace pomalý a poměrně dlouho se také ustaluje (obvykle 10^{-12} až 10^{-8} sekund pro nízkomolekulární látky). U tohoto druhu polarizace hraje po vložení dielektrika do elektrického pole výraznou roli tepelný pohyb nosičů náboje. Na rozdíl od deformační polarizace je relaxační polarizace ztrátová díky ohřívání samotného dielektrika. [3]

Tabulka 1: Relativní permitivita vybraných dielektrik [4][5]

Materiál - dielektrikum	ϵ_r
Vakuum	1
Vzduch	1,00059
Papír	1,6 - 2,6
Dřevo	2,0 - 6,0
Epoxidová pryskyřice	2,5 - 8,0
Plexisklo	3,4
Sklo	3,7 - 10
Polyamid - PA	4,0 - 5,0
Porcelán	5,5 - 6,5
Křemík	11,7
Voda	81

1.3 Mechanické vlastnosti izolantů

Při výrobě a následném provozu elektrických zařízení jsou použité elektroizolační materiály kromě elektrického namáhání dále namáhány i dalšími vlivy. Jedním z těchto vlivů je zcela zásadní mechanické namáhání, které může při provozu způsobovat deformaci izolačního systému a tím zapříčinit vznik mechanického napětí na izolaci s následným zhoršením elektroizolačních vlastností. Toto namáhání může vzniknout již při samotné výrobě vinutí stroje, kde se vinutí ovijí izolační páskou, případně při vkládání vinutí do drážek. V provozu je způsobováno díky silám vyvozené dilatací při změnách teploty vinutí, mechanickými rázy vyvozené zkratovými proudy, případně namáháním vibracemi. Pro stanovení mechanických vlastností jednotlivých izolačních materiálů se provádí zkoušky základních vlastností, jakými jsou pevnost v tahu, ohybu a rázová houževnatost. Jednotlivé testování je prováděno dle příslušných norem pro izolační materiály. [3]

1.3.1 Tahové vlastnosti izolantů

Pro určování tahových vlastností izolantů je používána norma ČSN EN ISO 527-1 „Plasty - Stanovení tahových vlastností“. Zkoušky jsou prováděny na zkušebních strojích, které musí umět vyvinout určitou rychlost pro zkoušky tahem i ohybem s určitou tolerancí.

Mez pevnosti v tahu jakožto jedna ze zkoušek je označována σ_M s jednotkou MPa definována jako maximální napětí v tahu působící na zkušební těleso během zkoušky. Mechanické napětí v tahu označováno σ je definováno jako působící síla vztažená na jednotku plochy a je dáno vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [Pa]} \quad (4)$$

σ	<i>mechanické napětí</i>
F	<i>síla deformující těleso [N]</i>
A	<i>průřez tělesa kolmý na působící sílu [m²]</i>

Při dané zkoušce se měří i rozměrové změny vzorku, kde se porovnává zvětšení délky vzorky oproti původní délce takzvaným *poměrným prodloužením* ε v procentech. Jedním z dalších parametrů je *modul pružnosti v tahu* E_f udávaný v MPa, který udává poměr rozdílu mechanického napětí a poměrného prodloužení. [3]

1.3.2 Ohybové vlastnosti izolanů

Ohybové vlastnosti izolanů jsou zkoumány dle příslušné normy ČSN EN ISO 178 „Plasty – Stanovení ohybových vlastností“. Podstatou ohybové zkoušky je působení normovaného trnu s konstantní rychlostí a silou F na daný materiál, který je jako nosník umístěn uprostřed podpěr. Výsledkem ohybové zkoušky je *pevnost v ohybu* σ_{FM} v MPa definující jako maximální napětí v ohybu, které zkoušený vzorek vydrží bez strukturálního poškození. Dále je určena *deformace ohybem mezi pevnosti v ohybu* ε_{FM} udávaná v procentech, která určuje deformaci způsobenou ohybem při maximálním napětí v ohybu. V neposlední řadě pak samotná *deformace ohybem* ε_f v procentech a *model pružnosti v ohybu* E_f v MPa, který je daný jako poměr mezi rozdílem napětí v ohybu a deformací ohybem. [3]

Zkušební tělesa musí být v souladu s příslušnou materiálovou normou, nebo je potřeba zachovat jejich poměr délky a tloušťky. Při měření ohybových vlastností u např. kompozitního materiálu obsahující velmi hrubé plnivo je potřeba použít vzorek s minimální šířkou 30 mm. [3]

1.3.3 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost je jedna z dalších vlastností, která dobře popisuje mechanické dynamické namáhání izolačních materiálů. Pro stanovení parametrů je použito speciální zařízení zvané Charpyho padostroj. Jedná se o kyvadlové kladivo, které je schopno změřit rázovou energii W spotřebovanou k přeražení zkoušence. Zkušební těleso je umístěné vodorovně na podpěrách a následně přeraženo rázovým úderem kladiva. Měřený vzorek musí splňovat určité rozměry dané typem velikosti materiálu a také musí být správně orientován s ohledem na případné vrstvení nebo vyztužení izolačního materiálu. Výsledkem zkoušky je *rázová houževnatost Charpy*, která je rozdělena na dva druhy podle toho, zda bylo použité zkušební těleso s vrubem, nebo bez vrubu. [3]

1.4 Tepelné stárnutí

Odolnost elektrických zařízení výrazně závisí na tepelné odolnosti izolačního systému, který bývá nejslabším článkem z hlediska spolehlivosti celého zařízení. Tepelné namáhání izolantu vede celkově k zhoršení jeho mechanických i elektrických vlastností. Dochází při něm k narušení struktury, případně tvaru izolantu, a hlavně se zrychluje stárnutí, projevující se zejména u organických izolantů.

Izolační systémy jsou z hlediska tepelné odolnosti rozděleny do tepelných tříd. Jejich zařazení se určuje podle výsledků zkoušek rychlého stárnutí. V.M. Montsinger stanovil, že vlivem teplotního namáhání materiálu nastává mechanické stárnutí v celém průběhu teplotního namáhání, a ne až po překročení pevné hranice stanovené určitou číselnou hodnotou. Určil tak empirické Montsingerovo pravidlo, které poukazuje na souvislost mezi délkou životností izolace τ [h] a teplotou T [°C], při které izolace stárne.

$$\tau = A \cdot e^{\frac{B}{T}} [h] \quad (5)$$

A, B *materiálové konstanty*
 T *teplota [°C]*

Ze vztahu je zřejmé, že životnost materiálu klesá exponenciálně se zvyšováním teploty. Dobu života jednotlivých materiálů je možné určit z několika vztahů, jako je následující Arrheniova rovnice, nebo Büssingův teorém. [6]

$$\tau = a \cdot e^{\frac{W_a}{RT}} [h] \quad (6)$$

W_a *aktivační energie procesu [eV]*
 R *univerzální plynová konstanta (8,315 J · grad⁻¹ · mol⁻¹)*
 a *konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul*
 T *absolutní teplota [K]*

V teorii stárnutí dochází k přímé souvislosti změn chemické stavby izolantů vyvolané působením teploty. Z této skutečnosti vyplývá, že rychlost chemické reakce lze považovat za rychlost stárnutí. Tuto souvislost opodstatnil v jedné ze svých prací W. Büssing jako možnost formulace životnostního zákona. Vynesením logaritmu času na jednu osu a na druhou reciproční hodnotu absolutní teploty (1/T) získáme přímku odpovídající životnosti materiálu, tzv. Arrheniův graf. [7]

Arrhenův graf je výsledkem logaritmu životnosti izolace proti převrácené hodnotě absolutní teploty. Výsledkem by měla být klesající přímka, díky které lze určit chybějící hodnoty do Arrheniovi rovnice. V případě, že do stárnutí zasahují chemické reakce, tak se výsledná křivka určitým způsobem zakříví. [8]

$$\ln\tau = \ln A \cdot e^{\frac{B}{T}} [-] \quad (7)$$

V souvislosti s životností elektroizolačních materiálů je také důležitá veličina zvaná aktivační energie, která je definovaná jako energie, která musí být látce dodána, aby daná reakce mohla proběhnout. Jedná se o chemickou veličinu značící obvykle jako E_a se základní jednotkou $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Čím větší aktivační energii daný materiál má, tím více odolává chemickým reakcím způsobující zhoršení jeho vnitřní struktury. [9]

S ohledem na tepelnou odolnost izolačních materiálů se izolační materiály rozdělují dle normy ČSN EN 60085 ed. 2 do daných tříd tepelné odolnosti. Každé třídě je přiřazena maximální teplota, do níž jsou dané materiály použitelné. Rozdělení do jednotlivých tříd je hrubý odhad na základě dlouholetých zkušeností vzhledem k tomu, že přesné ověření zkouškou při maximální provozní teplotě odpovídající skutečnému provozu není jednoduché, ale také je příliš zdlouhavé a nákladné. Z tohoto důvodu se pro určení tepelné odolnosti napodobují provozní podmínky ve zjednodušeném pořadí za pomoci urychleného stárnutí umožňující určení křivek odolnosti tepelného namáhání a následné stanovení teplotních indexů, či dalších parametrů z technické normy. Za pomoci křivek lze pak dále vytvářet modely stárnutí teplotou. [7] [10]

Tabulka 2: Přehled tepelných tříd pro izolační materiály [7]

Relativní index teplotní odolnosti RTE	Teplotní třída	Předchozí označení
< 90	70	
> 90 - 105	90	Y
> 105 - 120	105	A
> 120 - 130	120	E
> 130 - 155	130	B
> 155 - 180	155	F
> 180 - 200	180	H
> 200 - 220	200	N
> 220 - 250	220	R
> 250	250	

2 Diagnostické signály umožňující popis degradace materiálu

Izolační systém elektrického zařízení je nejcitlivější část, která vlivem vnějšího prostředí a provozních podmínek stárne a zhoršuje tak své izolační vlastnosti. Aby nedošlo k proražení izolace a následnému poškození elektrického zařízení, tak je důležitá diagnostika izolačních systémů tvořících celý izolační systém zařízení. Diagnostika probíhá za simulování různých fyzikálních zákonitostí, při kterých se zaznamenávají změny a vývoj parametrů dále zvané jako diagnostické signály. Cílem je získat co nejvíce informací o diagnostikovaném objektu za účelem splnění určitých kritérií v tolerančních mezích.

Pro diagnostiku izolačních systémů se nejčastěji používá **fenomenologický přístup**, který se zaměřuje pouze na reakce diagnostikovaného vzorku na přiložené vstupní diagnostické signály a tím se stává nejrychlejší a zároveň finančně nejdostupnější metodou. Druhá a složitější diagnostická metoda se nazývá strukturální. Tato metoda se věnuje dějům uvnitř systému a poskytuje tak přesnější informace, čímž se stává nákladnější a vyžadující speciální aparatury. [11]

Při návrhu izolačního systému je potřeba zkombinovat veškeré diagnostické signály, které budou do degradace materiálu zasahovat do jednoho výsledného modelu. Model stárnutí napomáhá k pochopení jednotlivých dějů probíhajících v materiálu.

2.1 Absorpční a resorpční charakteristiky

Jedná se o jednu z důležitých informací umožňující popis stavu izolačního systému. Absorpční a resorpční charakteristikou lze učit parametry izolantu, z nich nejdůležitější jsou vnitřní a povrchová rezistivita, izolační odpor a v neposlední řadě polarizační indexy.

Absorpční charakteristika je dielektrická absorpce vyjadřující složité nestacionární procesy probíhající v reálném dielektriku po připojení na stejnosměrné napětí. Absorpce se projevuje tak, že se dielektrikum nenabíjí okamžitě, nýbrž pozvolna s určitým zpožděním. Na první pohled se může zdát, že nabíjecí proudy kopírují exponenciální průběh. Ve skutečnosti se však mění pomaleji s časem než s výpočtem určené časové konstanty.

Resorpční charakteristika je dielektrická resorpce s podobným chováním, jako dielektrická absorpce. Rozdílem je, že se na místo nabíjení dielektrika jedná o vybíjení s podobným, avšak otočeným exponenciálním průběhem. K dielektrické resorpci dochází po odpojení dielektrika od stejnosměrného napětí vlivem přechodového děje. Tvar absorpční i resorpční charakteristiky lze vidět na *obrázku 6* v další kapitole. [12]

2.2 Měření vnitřní a povrchové rezistivity

Metodami a způsoby pro měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů se zabývá norma ČSN IEC 93 „Metody měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů“ a norma ČSN IEC 167 „Zkušební metody na stanovení izolačního odporu tuhých elektroizolačních materiálů“. [11]

Používané metody pro měření odporu lze rozdělit na přímé a porovnávací:

- **přímé (voltampérová metoda)**

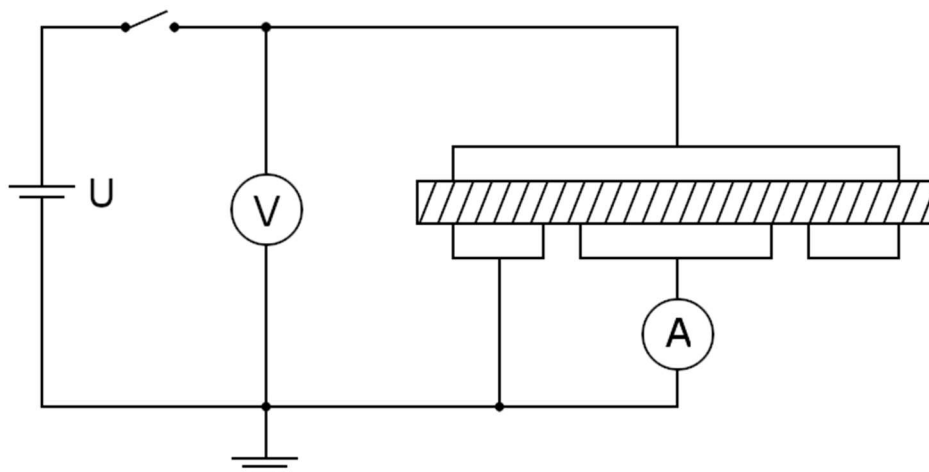
Současné měření přiloženého stejnosměrného napětí a protékajícího proudu na neznámém materiálu. Následně je dopočítán výsledný odpor. !doplnit zdroj z jedničky!

- **porovnávací (např. kompenzační metoda)**

Metoda založená na porovnávání proudů tekoucích přes odpory při konstantním napětí nebo hledání poměru neznámého odporu a známého odporníku v můstkovém zapojení.

2.2.1 Měření vnitřní a povrchové rezistivity voltampérovou metodou

Jedná se o nejjednodušší metodu přímého odečítání procházejícího proudu měřeným materiálem.

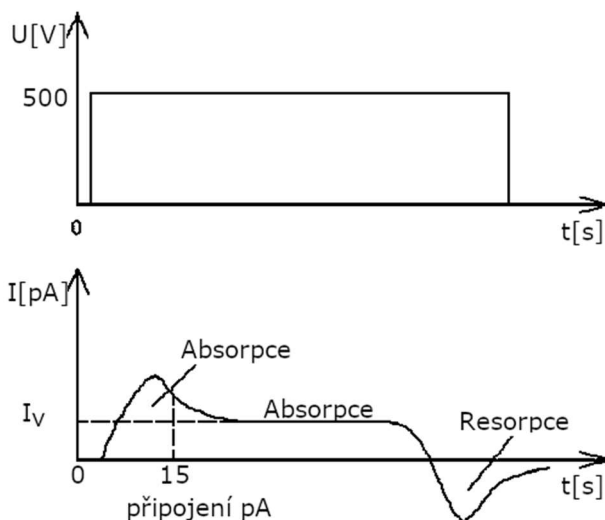


Obrázek 5: Blokové schéma voltampérové metody

Pro měření napětí je použit stejnosměrný voltmetr a pro měření proudu odpovídající přístroj pro odečítání i velmi malých proudů. Kvalitní materiály vyžadují přístroj s citlivostí minimálně 10^{-16} . Neznámý izolační odpor se následně dopočítá pomocí Ohmova zákona.

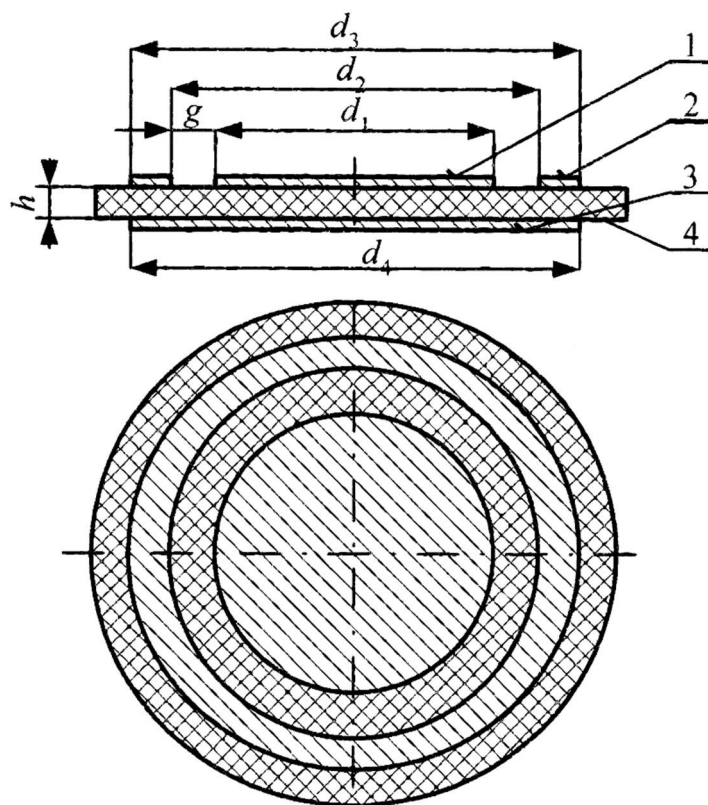
$$R_X = \frac{U}{I_X} [\Omega] \tag{8}$$

R_X neznámý izolační odpor měřeného materiálu
 U přiložené stejnosměrné napětí [V]
 I_X proud protékající měřeným materiálem [A]



Obrázek 6: Průběh proudu vzorkem po připojení napětí převzato z [3]

Měřené vzorky mohou mít prakticky jakýkoliv tvar, který je možný umístit mezi elektrody potřebné pro měření. Při měření vnitřního odporu musí být délka či průměr měrné elektrody alespoň desetinásobkem tloušťky měřeného vzorku. Rozměr nechráněné elektrody se má rovnat vnitřnímu rozměru ochranné elektrody. Při měření povrchového odporu má být velikost mezery mezi chráněnou a ochranou elektrodou minimálně dvojnásobek tloušťky měřeného vzorku. Rozměr chráněné elektrody má být minimálně desetinásobkem tloušťky měřeného vzorku. [3]



Obrázek 7: Elektrodotová uspořádání pro měření vnitřního a povrchového odporu.
 1 – chráněná (měrná) elektroda, 2 – ochranná elektroda, 3 – ochranná elektroda, 4 – vzorek, ,
 převzato z [3]

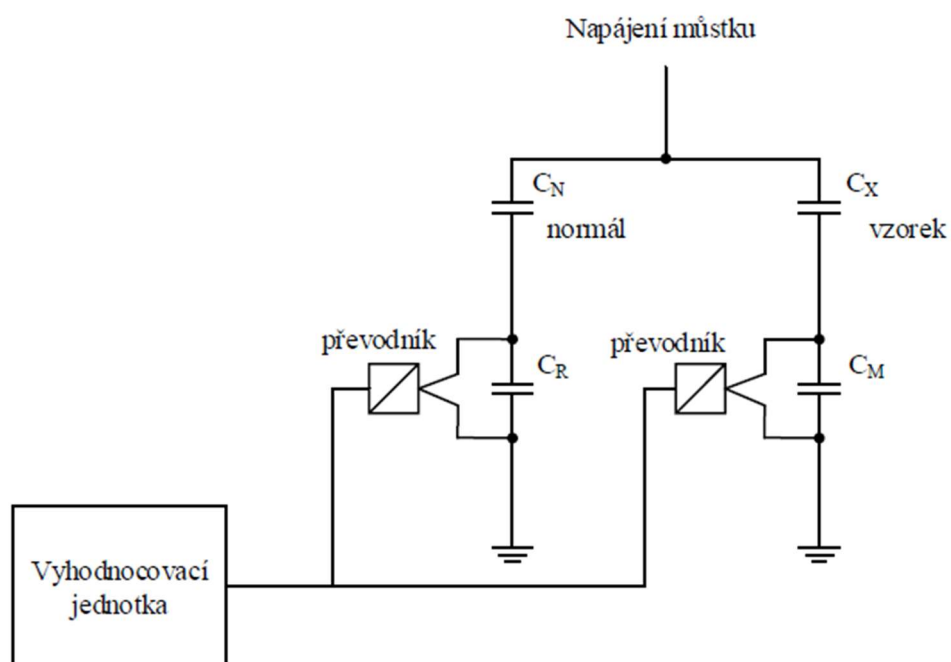
Se znalostí změřeného vnitřního odporu uvedeného výše je možné dále vypočítat vnitřní rezistivitu ρ_V [$\Omega \cdot m$]. Odpor lze také měřit přímo a to megaohmetrem.

$$\rho_V = R_X \cdot \frac{A}{h} [\Omega \cdot m] \quad (9)$$

ρ_V	vnitřní rezistivita
R_X	neznámý odpor měřeného materiálu [Ω]
A	efektivní plocha měrné elektrody [m^2]
h	průměrná tloušťka vzorku [m]

Celkově tak ztrátový činitel se stárnutím materiálu postupně roste, avšak může mít odlišný průběh stárnutí kupříkladu při stárnutí elektrickým polem, kde při namáhání sinusovým průběhem narůstá ztrátový úhel postupně, ale naopak při namáhání pulzním vysokofrekvenčním napětím zpočátku mírně klesá a až poté se prudce zvyšuje. [7]

Jeho měření probíhá na automatickém můstku využívaného klasického principu Scheringova můstku. Kondenzátory jsou zapojeny jako kapacitní dělič, kde C_N a C_X jsou vysokonapěťové a C_R , C_M nízkonapěťové kondenzátory. Nízkonapěťové kondenzátory C_M a C_R jsou nastaveny tak, aby byly dělicí poměry větví stejného řádu. Napětí na nízkonapěťových kondenzátorech je snímáno a zasíláno do vyhodnocovací jednotky, kde se ztrátový úhel dopočítá z fázového úhlu mezi změřenými napětími. [3]



Obrázek 9: Blokové schéma automatického můstku

2.4 Polarizační indexy

Polarizační indexy jsou bezrozměrná čísla využívající pro popis stavu materiálu časovou proměnnost absorpčního proudu. Je definován jako poměr absorpčních proudů v čase po přiložení napětí na vzorek. Jednominutový polarizační index pi_1 se určí poměrem absorpčních proudů v patnácté a šedesáté sekundě. Polarizační indexy nejsou závislé na rozměrech stroje. Měření v určitém čase se provádí kvůli izolačnímu odporu, který citlivě reaguje na nejslabší místo izolačního systému. Izolační odpor často klesá vlivem vlhkosti a vodivých nečistot. Jeho velikost se zpravidla ustálí po šedesáté sekundě od přiložení napětí.

$$pi_1 = \frac{i_{15}}{i_{60}} [-] \quad (10)$$

i_{15} absorpční proud odečtený 15s po přiložení napětí
 i_{60} absorpční proud odečtený 60s po přiložení napětí

Izolační materiály v dobrém stavu mají výsledný polarizační index výrazně vyšší než jedna. Nekvalitní izolace, vlhké nebo poškozené mají přibližně stejné hodnoty absorpčního proudu, a proto se jejich výsledný poměr přibližuje k jedné. Je to dáno tím, že kvalitní izolant by měl mít z počátku nízký odpor a tím pádem se chovat jako nenabitá kapacita. Proud by měl postupně rychle klesat a odpor materiálu by se měl prudce zvyšovat. U izolantů se při diagnostice provádí i výpočet poměru dielektrické absorpce, což je v podstatě stejný údaj jako poměr polarizačních indexů. Diagnostické přístroje obvykle zaznamenávají proudy procházející testovacím vzorkem po 15, 30 sekundách a následně po 10 minutách. [13]

Tabulka 3: Stav izolace z pohledu polarizačního indexu

Polarizační index [PI]	$\geq 4,0$	2,0 - 4,0	1,0 - 2,0	$\leq 1,0$
stav izolace	výborná	dobrá	nebezpečná	špatná

2.5 Stárnutí elektroizolačních materiálů

Elektroizolační materiály a jejich vlastnosti jsou v elektrických zařízeních velice důležité, a proto jsou z hlediska degradace za působení různých vlivů důkladně studovány. Z toho důvodu se provádí různé diagnostiky a modely stárnutí, které stanovují charakteristiky stárnutí různých materiálů. Znalost potřebných vlastností týkající se stárnutí a degradace materiálu je zcela nutná pro návrh elektrických zařízení, ke kterým je zároveň potřeba znát provozní podmínky a působící faktory, které budou na elektrické zařízení působit či ve kterém prostředí se bude zařízení nacházet.

V praxi se provádějí různé zrychlené zkoušky životnosti, srovnávací zkoušky a spousty dalších testů zaměřujících se na jednotlivé degradační faktory jednotlivě i kombinovaně. Pro elektroizolační materiál nejsou důležité jen elektrické parametry, ale i vliv mechanických a tepelných účinků. Podle parametrů se pak izolační systém rozděluje do různých kritérií, hodnotí a třídí.

Stárnutí elektroizolačních materiálů je definováno normou ČSN EN 60505 „Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů“ jako postupné nevratné změny vlastností elektroizolačního systému důsledkem působení jednoho nebo více ovlivňujících faktorů. Jedné se o vlivy elektrické, tepelné, mechanické a ostatní vlivy prostředí způsobující stárnutí izolačního systému, které vedou ve svém důsledku k poruše. [11]

2.5.1 Elektrické stárnutí

Jedná se o stárnutí elektroizolačního systému zahrnující účinky působení elektrického pole a vznik částečných výbojů, plazivých proudů, elektrolýzy, elektrických trsů, účinky prostorových nábojů apod.

2.5.2 Tepelné stárnutí

Stárnutí zahrnující chemické a fyzikální změny vznikající v důsledku chemických degradačních reakcí vlivem teploty. Jedná se např. o depolymerační reakce, difúzi apod. [11]

2.5.3 Mechanické stárnutí

Mechanické stárnutí elektroizolačního materiálu je třeba sledovat při procesu výroby, jeho montáži a během provozu elektrického zařízení. Tento typ stárnutí způsobený hlavně vlivem elektrodynamických, elektromagnetických a tepelných sil bývá jednou z hlavních příčin degradace a změn vlastností elektroizolačního systému. [11]

2.5.4 Působení dalších faktorů

Existuje spousta dalších faktorů ovlivňujících stárnutí elektroizolačního systému, které ovlivňuje převážně prostředí, ve kterém se samotné zařízení nachází. Jedná se například o přítomnost chemických zplodin, vlhkosti apod., které za přítomnosti dalšího faktoru způsobují degradaci materiálu.

Jednou z faktorů může být **vlhkost**, která může ovlivnit mechanické vlastnosti, rezistivitu, permitivitu a elektrickou pevnost elektroizolačního materiálu. Povrchová vlhkost, případně námraza mohou vést k povrchové erozi, či přeskoku.

Dalším faktorem je **kyslík** způsobující oxidaci elektroizolačního materiálu a tím trvalé zhoršení jeho vlastností. Jeho působení je závislé na množství dalších faktorů jakými jsou chemické složení, teplota, vlhkost a přítomnost antioxidantů.

Mikroorganismy, jakožto další degradační faktor působící na elektroizolační materiály. Organické mikroorganismy, zejména bakterie a plísně mohou materiál využívat jako zdroj energie, což může způsobit chemické, mechanické nebo elektrické narušení izolace. [11]

Chemické vlivy mohou způsobit různé interaktivní reakce, při kterých také dochází ke změně původních vlastností materiálu, zejména korozní děje. [11]

Povětrnostní vlivy způsobují změny teploty a proudění vzduchu, se kterým se do zařízení může dostat prach a jiné mechanické částice, které mohou narušovat povrch elektroizolačního materiálu. Prach navíc svým usazením zhoršuje odvod tepla a tím přispívá k urychlení degradace včetně zhoršení vlastností samotného izolačního systému jakožto odporu.[11]

Posledním ze zmíněných faktorů může být **radiace**, která může způsobovat značnou degradaci materiálu působením vysokoenergetických částic. [11]

3 Výroba kompozitního materiálu

3.1 Používaná technologie pro výrobu kompozitu

3.1.1 Systém resin-rich

V případě použití této technologie se jedná v podstatě o tříslložkový kompozit s výchozím předimpregnovaným materiálem dodávaný ve formě polotovaru s 30 až 40 procenty pojiva. Jako nosný materiál se využívá skleněná tkanina a izolační barierou je kalcinovaný slídový papír. Pojivem pro oba materiály je reaktoplastická bezrospouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Pryskyřice je již výrobcem nanесena na pásy nosného materiálu v takzvaném B stavu, což znamená, že je částečně vytvrzena. Takto připravený polotovar zjednodušuje celou aplikaci. Proces je využíván v izolaci cívek vinutí velkých točivých strojů. [3]

Technologický postup je takový, že se páska nanese na vodivé části, kde po ohřátí na teplotu kolem 90° C začíná gelovatět a vytváří izolační kompaktní vrstvu o požadované tloušťce stěny. Proces dále pokračuje zahřátím na vytvrzovací teplotu kolem 160 až 170° C a následným setrváním po potřebnou dobu vytvrzení, která závisí na druhu použité pryskyřice a tloušťce izolační vrstvy. V konečné fázi se materiál pozvolna ochlazuje, aby nedošlo k mechanickému pnutí uvnitř materiálu a porušení izolační vrstvy. Připravené části vinutí jsou pak bez dalších úprav vkládány přímo do drážek stroje, kde izolační část vykazuje velmi dobrou elektrickou pevnost.

3.1.2 Systém VPI (Vaccum Pressure Impregnation)

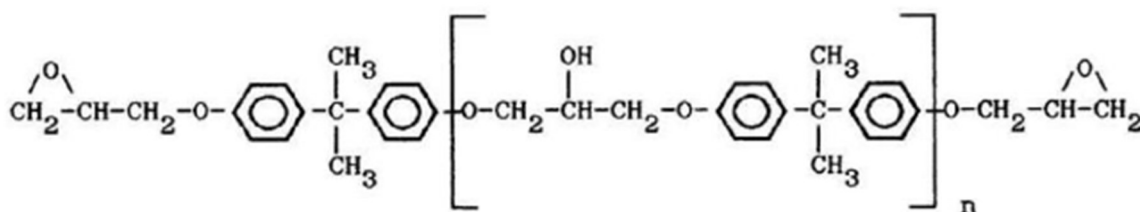
V tomto systému je základním materiálem a zároveň izolační bariérou savý nekalcinovaný slídový papír, který se při impregnačním procesu prosytí impregnantem. Jako nosný materiál se zde používá skleněná tkanina, polyesterové rouno nebo polyimidová fólie a epoxidová pryskyřice s obsahem do 7% jako pojivo. Postupem je možné impregnovat jednotlivé tyče, nebo větší celky. Jedná se o celkově náročnější způsob, který má svůj význam zejména u trakčních motorů, kde je potřeba impregnační systém zpevňující vinutí při výborných izolačních i teplotních vlastnostech. Technologie je také šetrnější k životnímu prostředí díky použití bezrozpuštědlových pryskyřic.

Technologický postup začíná opět obalením tyče izolační páskou a následně pokračuje impregnačním procesem, který začíná sušením pro odstranění vlhkosti při teplotě vyšší než 100°C po dobu přibližně 20 hodin. Následující krok spočívá v umístění předmětu do impregnační kotle, kde zavedené vakuum odstraní zbytky těkavin a vlhkosti. Poté je impregnační kotel ode dna plněn impregnantem, jehož složení musí být chemicky slučitelné s pojivem izolační pásky. Po naplnění je do zaveden přetlak, který podpoří proces absorpce impregnantu izolační páskou. Nakonec se impregnant vypustí a izolační systém se umístí do sušárny. Samotné sušení je rozděleno na dvě části, kdy první z nich probíhá za mírného tlaku kvůli urychlení vyprchání těkavých látek a druhá za normálního tlaku s prouděním teplého vzduchu při kterém dochází k vytvrzení pryskyřice. [3]

3.2 Materiály použité pro výrobu kompozitního materiálu

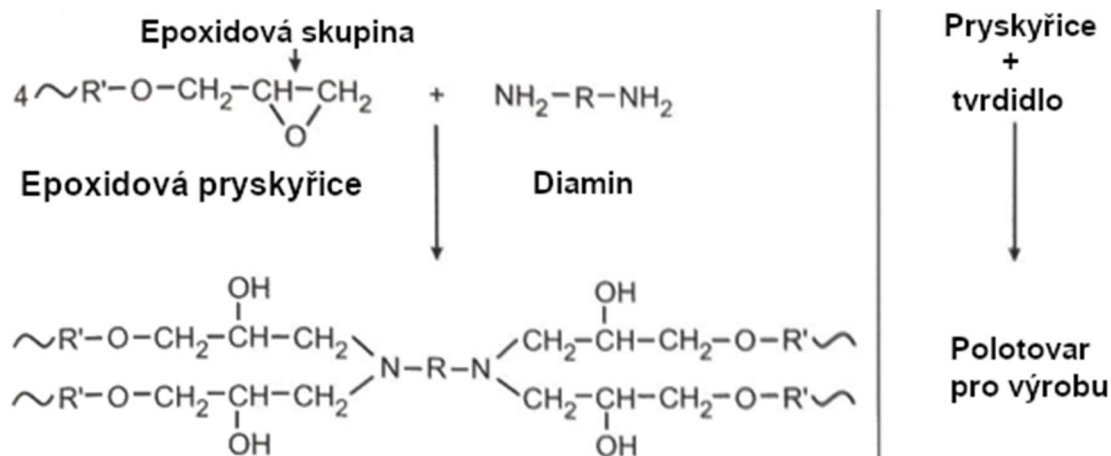
Pro výrobu vzorků použitých v této diplomové práci byla užitá epoxidová pryskyřice EC141 a polyamid PA6.

Použitá pryskyřice EC141 se řadí jako většina do skupiny pryskyřic na bázi dianu, které jsou ve světě nejrozšířenější. Jejich výroba probíhá alkalickou kondenzací dianu s epichlorhydrinem, kde vzájemný molární poměr látek ovlivňuje molekulovou hmotnost, jakožto důležitý parametr celkově charakterizující výsledné vlastnosti, mezi které patří viskozita, rozpustnost a chemická odolnost. EC141 je typ dvousložkové pryskyřice umožňující vytvrzování pokojovou teplotou, u které se oproti pryskyřicím vytvrzované za tepla očekává horší zpracovatelnost a menší viskozita. Pojivo EC141 se také hodí pro odlévání velkých hmot z důvodu nízké exotermie a je dobře odolné proti UV záření. [14][15]



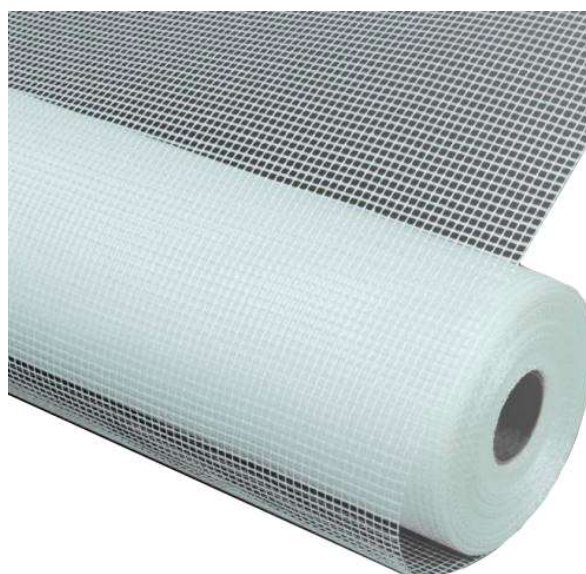
Obrázek 10: Strukturální vzorec epoxidové pryskyřice na bázi dianu, převzato z [15]

Vzhledem k tomu, že se jedná o dvousložkovou hmotu, tak je potřeba použít tvrdidlo W241, případně W242 přímo určené pro pryskyřici EC141. Jedná se o tvrdidlo tvořeno alifatické aminy jakožto deriváty uhlovodíků, což jsou molekuly obsahující aktivní vodíkový atom. Tvrdidlo slouží jako spojovací jednotka a je součástí výsledného řetězce. Z tohoto důvodu se musí pryskyřice s tvrdidlem mísit v ekvivalentních množstvích což vede k zavedení epoxidového čísla, či vodíkového ekvivalentu. Toto číslo určuje, kolik gramů tvrdidla je potřeba vmístit do 100 g pryskyřice. Výrobce Elan-Tech určuje poměr dvousložkové hmoty EC141 v kombinaci s W241 100:45, respektive 45 gramů tvrdidla na 100 gramů pryskyřice. Dále výrobce doporučuje tvrdnutí při teplotě 25 stupňů celsia po dobu 75 až 95 minut. [16][17]



Obrázek 11: Schéma vytvrzování epoxidové pryskyřice diaminem, převzato z [17]

Materiál polyamid PA6, který slouží jako plnivo pro vyrobené experimentální vzorky představuje kombinaci mechanické tuhosti, pevnosti, schopnosti tlumení a odolnosti vůči opotřebení. Jeho nejvýznamnější parametr pro vyrobené vzorky je jeho výborná elektroizolační schopnost. Všechny tyto vlastnosti jsou určeny zejména skladbou a strukturou molekulárních vazeb. Jedná se tak o makromolekulární a částečně krystalický termoplast, který díky svým vlastnostem patří mezi základní a nejpoužívanější průmyslové plasty. [18]



Obrázek 12: Plnivo mesh PA6 NMO1000 [19]

3.3 Postup při výrobě kompozitního materiálu

Níže popsané postupy pro výrobu kompozitního materiálu jakožto elektroizolačního systému pro testování byly použity pro výrobu vzorků, se kterými se v diplomové práci dále pracuje a je na nich prováděno samotné měření. Bylo vyrobeno několik vzorků s odlišným typem plniva, jimiž jsou **mikročástice PA6**, **fólie**, **mesh** a v poslední řadě pouze kompozit obsahující čistou pryskyřici, tedy samotnou matrici. Postupy výroby s jiným typem plniva se mezi sebou nikterak neliší a jsou prakticky stejné.

Při výrobě byla zvažována hmotnost hotového vzorku na 15 gramů. Z důvodu rychlého tvrdnutí roztoku po aplikování tvrdidla a menších ztrát při přelívání z jedné nádoby do druhé byla zvolena rezerva cca. 3 gramy na jeden vzorek. Co se týče samotných poměrů, tak bylo vždy voleno poměru 1:2, tedy 60 gramů pryskyřice EC141 a 30 gramů tvrdidla W241. V případě výroby kompozitu s mikročásticemi byl použit poměr 1:100, tedy 0,9 gramu mikročástic PA6

3.3.1 Zvolený postup výroby testovacích vzorků

1. Použití magnetické míchačky se stálým ohřevem na 60°C. Zvolená teplota se bude udržovat po celou dobu výroby vzorku.
2. Do připravené nahřáté nádoby je třeba nalít 60 gramů epoxidové pryskyřice EC141, kterou poté vložit na míchačku a nechat zhruba po dobu 5ti minut ohřát.
3. Dalším krokem je přidání plniva, u kterého je v případě výroby vzorku s mikročásticemi PA6 je voleno 0,9 gramů. U výroby vzorků s fólií, či „mesh“ je plnivo vkládáno až na konci výroby vzorku. Po aplikování mikročástic je nádobu potřeba umístit zpět na magnetickou míchačku s ohřevem, kde by se měla nechat po dobu jedné hodiny míchat rychlostí 60 - 70 otáček za minutu.

4. Následně je třeba polotovar přelit do baňky přizpůsobené tak, aby mohla být připojena k vakuové pumpě. Tuto nádobu je třeba dobře utěsnit a umožnit tak průchod vzduchu pouze otvorem určeným pro připojení k vakuové pumpě. Po připojení k pumpě je třeba nechat odvést co nejvíce vzduchu ze směsi a zároveň zachovat její teplotu za stálého míchání s 60 – 70 otáčky na magnetické míchačce. Tento krok je potřeba nechat alespoň 2 hodiny aplikovat.



Obrázek 13: Vakuová pumpa (vlevo) spolu s magnetickou míchačkou (vpravo)

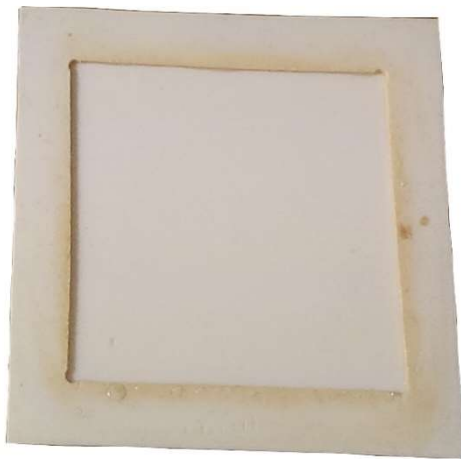
5. Pokud stanovený čas uplyne a směs nevykazuje téměř žádné známky přítomnosti vzduchu projevujícím se bublinkami v samotném polotovaru je možné baňku od vakuové pumpy odpojit a přidat 30 gramů tvrdila W241.



Obrázek 14: Nádoba umožňující připojení k vakuové pumpě

Směs je nyní potřeba nechat důkladně promíchat na magnetické míchačce s rychlostí otáček 1000 za minutu při stále stejné teplotě 60°C po dobu zhruba 5 minut.

6. Po důkladném promíchání je třeba řádně uzavřenou baňku s polotovarem připojit zpět k vakuové pumpě a nechat vakuovat po dobu 15 – 20 minut s otáčky 60 - 70 za minutu. Tímto krokem se ze směsi snažíme dostat co nejvíce vzduchu vzniklého při předchozím promíchání za co nejkratší čas kvůli přítomnosti tvrdidla. Tímto je směs pro kompozit hotova a je potřeba ji pouze vytvarovat na požadovaný rozměr.
7. Směs je potřeba co nejrychleji vytvarovat kvůli přítomnosti tvrdila. To je učiněno rozlitím směsi na připravenou teflonovou destičku, na kterou je přiložena silikonová šablona. Těsnost mezi destičkou a šablonou je zajištěna silikonovou pastou. Na každý vzorek je viz. úvod použito 15g směsi. V případě výroby vzorku s plnivem „mesh“ nebo folií je aplikováno 10 gramů směsi, následně vloženo plnivo a nakonec zalito zbylými 5 gramy směsi.



Obrázek 15: Silikonová šablona na teflonové destičce

8. Nakonec je hotový vzorek potřeba nechat alespoň 48 hodin při pokojové teplotě 22°C tvrdnout.

Postupy pro výrobu vzorků s jiným typem plniva jsou odlišné pouze u kroku 3 a 7. V případě vzorku pouze s čistou pryskyřicí je krok 3 zcela vynechán.

4 Určení stárnutí izolačního materiálu

Jak již bylo zmíněno, tak bylo celkově vyrobeno 12 vzorků, respektive 3 vzorky od každého druhu se čtyřmi různými typy plniva. Vzorky měly různou tloušťku, která byla pro další měření zaokrouhlena na 1,4208 mm.

Jednotlivé vzorky byly měřeny pomocí voltampérové metody pod stejnosměrným napětím 500 V. Kvůli stanovení polarizačních indexů byl proud odečítán po patnácti, šedesáti sekundách a deseti minutách po přivedení napětí na elektrody.

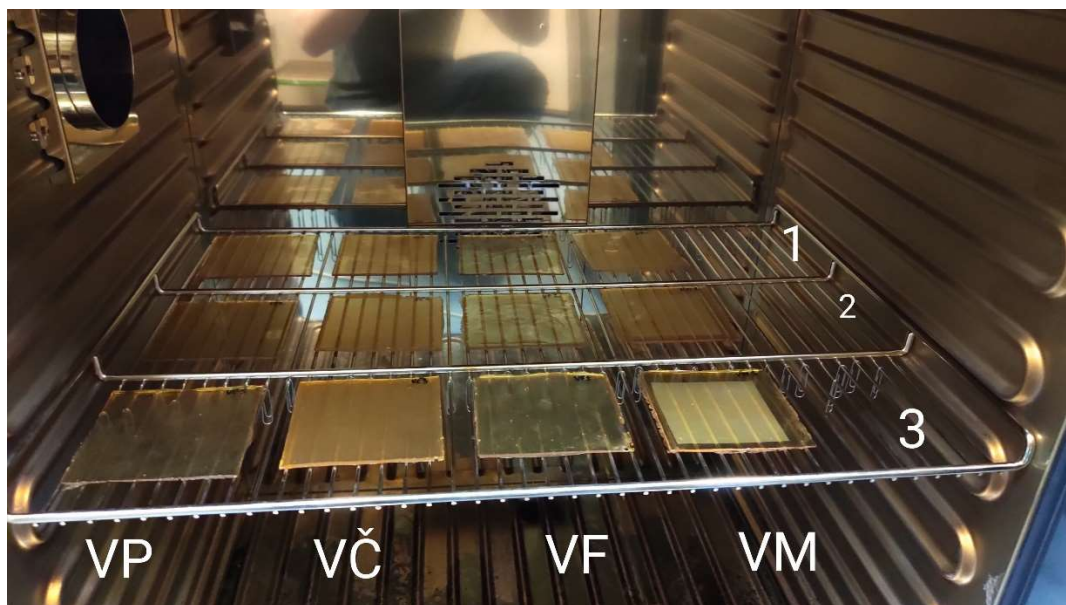
4.1 Proces tepelným zatížením

První měření proběhlo 7.12.2019 v době, kdy vzorky ještě nebyly zatíženy tepelným stárnutím. Po prvním vložení do trouby a následným začátkem zatížení vzorků tepelným stárnutím se tak výsledky výrazně liší. Celkem bylo provedeno pět měření s určitým časovým rozestupem stráveným v troubě. Druhé měření bylo provedeno po šesti dnech strávených v troubě, respektive po 144 hodinách. Následoval minimálně dvanáctihodinový proces vybíjení od povrchového elektrického náboje, kdy byly vzorky umístěny mezi ocelové destičky a připojeny k zemi. Následné měření proběhlo po dalších šesti dnech od předchozího měření, celkově tak po 288 hodinách. Při tomto měření už bylo možné sledovat větší změny. Čtvrté odečítání hodnot proběhlo po dalších 12 dnech, respektive po 576 celkových hodinách strávených v prostředí s teplotou okolo 100 stupňů celsia. Páté a zároveň poslední měření bylo provedeno po 31 dnech od posledního měření, tedy po celkových 1320 hodinách strávených v troubě.



Obrázek 16: Uzemněné vzorky z důvodu vybití elektrostatického napětí

Postupně bylo možné sledovat na vzorkách stárnutí i z vizuální stránky. Docházelo k postupnému zežloutnutí a lehkému zkroucení, zejména u vzorků s fólií. K jednoduššímu popisu byly pro jednotlivé vzorky určeny zkratky VP – vzorky s čistou pryskyřicí, VF – vzorky s fólií, VČ1 – vzorky s mikročásticemi a VM – pro vzorky s plnivem ve tvaru pletiva, mesh.



Obrázek 17: Vzorky umístěné v troubě po 144 hodinách

4.1.1 Měření povrchové rezistivity voltampérovou metodou

Tabulka 4: Voltampérová charakteristika prvního měření

Měření: 1 - 7.12.2019				Doba v troubě: 0 hodin											
Čistá pryskyřice				Fólie				Mikročástice				Mesh			
VP1 - vzorek 1				VF1 - vzorek 1				VČ1 - vzorek 1				VM1 - vzorek 1			
Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]
15 s			6,9021	15 s			4,7134	15 s			12,3083	15 s			6,1734
60 s	1,426	500	2,8105	60 s	1,343	500	1,9151	60 s	1,744	500	3,9604	60 s	1,507	500	2,2172
10 min.			1,0498	10 min.			0,7558	10 min.			1,0477	10 min.			0,9156
VP2 - vzorek 2				VF2 - vzorek 2				VČ2 - vzorek 2				VM2 - vzorek 2			
Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]
15 s			5,4019	15 s			5,9372	15 s			14,0289	15 s			10,8713
60 s	1,349	500	2,2808	60 s	1,379	500	4,095	60 s	1,465	500	5,3629	60 s	1,417	500	5,2933
10 min.			0,5727	10 min.			1,0163	10 min.			1,3095	10 min.			1,2532
VP3 - vzorek 3				VF3 - vzorek 3				VČ3 - vzorek 3				VM3 - vzorek 3			
Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]
15 s			7,9666	15 s			5,7948	15 s			12,0891	15 s			13,1893
60 s	1,347	500	3,8937	60 s	1,256	500	2,4946	60 s	1,466	500	3,8764	60 s	1,351	500	6,2084
10 min.			0,8478	10 min.			1,0735	10 min.			1,0375	10 min.			1,8095

Tabulka 5: Voltampérová charakteristika druhého měření

Měření: 2 - 13.12.2019				Doba v troubě: 144 hodin											
Čistá pryskyřice				Fólie				Mikročástice				Mesh			
VP1 - vzorek 1				VF1 - vzorek 1				VČ1 - vzorek 1				VM1 - vzorek 1			
Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]
15 s			6,8019	15 s			2,6935	15 s			7,3378	15 s			3,3334
60 s	1,426	500	2,4012	60 s	1,343	500	1,0306	60 s	1,744	500	2,1909	60 s	1,507	500	1,1430
10 min.			0,6132	10 min.			0,3293	10 min.			0,4027	10 min.			0,2808
VP2 - vzorek 2				VF2 - vzorek 2				VČ2 - vzorek 2				VM2 - vzorek 2			
Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]
15 s			7,7001	15 s			4,4879	15 s			5,2688	15 s			5,7346
60 s	1,349	500	2,7067	60 s	1,379	500	1,5734	60 s	1,465	500	1,8221	60 s	1,417	500	1,9423
10 min.			0,7066	10 min.			0,4617	10 min.			0,2964	10 min.			0,5208
VP3 - vzorek 3				VF3 - vzorek 3				VČ3 - vzorek 3				VM3 - vzorek 3			
Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]	Čas	h	Uss [V]	Iss [pA]
15 s			6,0497	15 s			3,0619	15 s			6,6560	15 s			5,7307
60 s	1,347	500	2,0860	60 s	1,256	500	1,2438	60 s	1,466	500	1,9907	60 s	1,351	500	1,9762
10 min.			0,6883	10 min.			0,3548	10 min.			0,4069	10 min.			0,5391

Tabulka 6: Voltampérová charakteristika třetího měření

Měření: 3 – 21.12.2019				Doba v troubě: 288 hodin											
Čistá pryskyřice				Fólie				Mikročástice				Mesh			
VP1 - vzorek 1				VF1 - vzorek 1				VČ1 - vzorek 1				VM1 - vzorek 1			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s	1,426	500	5,6878	15 s	1,343	500	1,4141	15 s	1,744	500	5,9401	15 s	1,507	500	2,0076
60 s			1,9575	60 s			0,5631	60 s			1,7034	60 s			0,7891
10 min.			0,5036	10 min.			0,1712	10 min.			0,3385	10 min.			0,2006
VP2 - vzorek 2				VF2 - vzorek 2				VČ2 - vzorek 2				VM2 - vzorek 2			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s	1,349	500	5,8590	15 s	1,379	500	2,4939	15 s	1,465	500	3,8635	15 s	1,417	500	3,1530
60 s			1,9486	60 s			1,0320	60 s			1,3272	60 s			1,2109
10 min.			0,6104	10 min.			0,3305	10 min.			0,2403	10 min.			0,3176
VP3 - vzorek 3				VF3 - vzorek 3				VČ3 - vzorek 3				VM3 - vzorek 3			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s	1,347	500	4,1634	15 s	1,256	500	2,1270	15 s	1,466	500	3,6504	15 s	1,351	500	2,1958
60 s			1,5108	60 s			0,7902	60 s			1,1788	60 s			0,8467
10 min.			0,4019	10 min.			0,2129	10 min.			0,2370	10 min.			0,2386

Tabulka 7: Voltampérová charakteristika čtvrtého měření

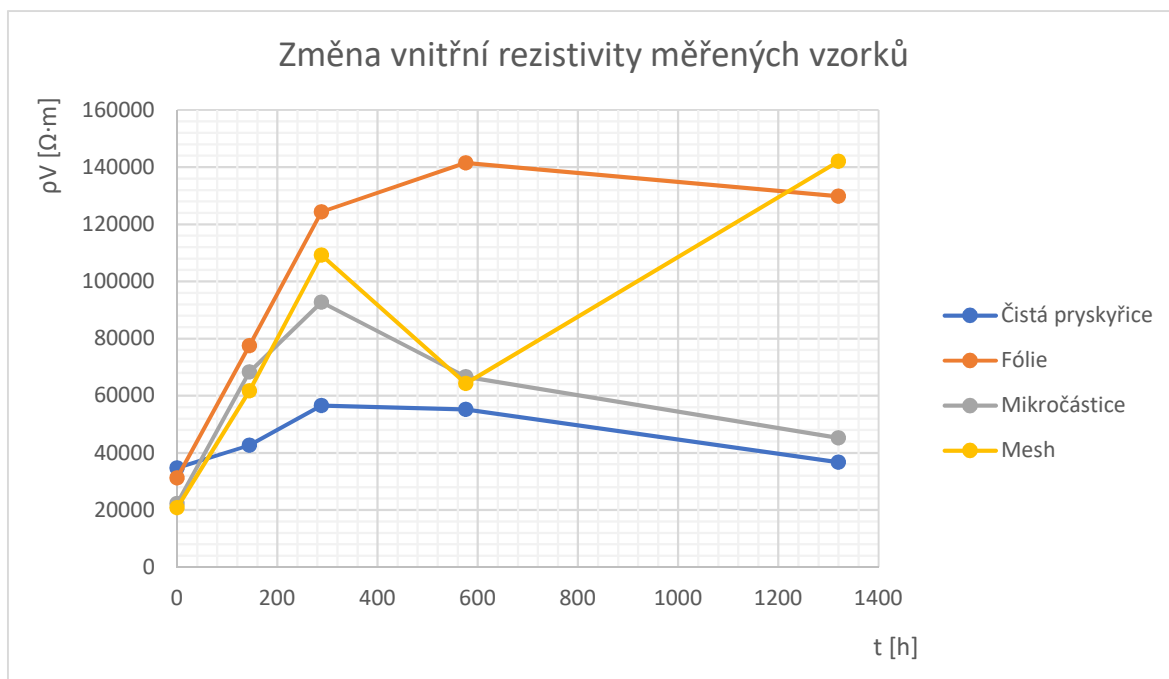
Měření: 4 - 3.1.2020				Doba v troubě: 576 hodin											
Čistá pryskyřice				Fólie				Mikročástice				Mesh			
VP1 - vzorek 1				VF1 - vzorek 1				VČ1 - vzorek 1				VM1 - vzorek 1			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s	1,426	500	2,1983	15 s	1,343	500	1,5436	15 s	1,744	500	6,4486	15 s	1,507	500	3,4694
60 s			0,8032	60 s			0,6127	60 s			2,1781	60 s			1,3893
10 min.			0,1247	10 min.			0,2054	10 min.			0,4314	10 min.			0,4181
VP2 - vzorek 2				VF2 - vzorek 2				VČ2 - vzorek 2				VM2 - vzorek 2			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s	1,349	500	7,7408	15 s	1,379	500	2,1011	15 s	1,465	500	3,4237	15 s	1,417	500	4,4445
60 s			3,0338	60 s			0,7464	60 s			2,3105	60 s			1,6314
10 min.			0,7357	10 min.			0,1905	10 min.			0,3467	10 min.			0,4504
VP3 - vzorek 3				VF3 - vzorek 3				VČ3 - vzorek 3				VM3 - vzorek 3			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s	1,347	500	3,9318	15 s	1,256	500	3,1075	15 s	1,466	500	7,3228	15 s	1,351	500	3,8239
60 s			2,6800	60 s			0,5567	60 s			2,0904	60 s			1,6487
10 min.			0,6944	10 min.			0,2320	10 min.			0,3566	10 min.			0,4181

Tabulka 8: Voltampérová charakteristika pátého měření

Měření: 5 - 4.2.2020				Doba v troubě: 1320 hodin											
Čistá pryskyřice				Fólie				Mikročástice				Mesh			
VP1 - vzorek 1				VF1 - vzorek 1				VČ1 - vzorek 1				VM1 - vzorek 1			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s			5,8886	15 s			0,8809	15 s			4,7655	15 s			1,3716
60 s	1,426	500	2,4941	60 s	1,343	500	0,3672	60 s	1,744	500	1,7785	60 s	1,507	500	0,6443
10 min.			0,8196	10 min.			0,1934	10 min.			0,4360	10 min.			0,1785
VP2 - vzorek 2				VF2 - vzorek 2				VČ2 - vzorek 2				VM2 - vzorek 2			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s			7,2387	15 s			1,5629	15 s			7,1406	15 s			1,9482
60 s	1,349	500	2,5900	60 s	1,379	500	0,8800	60 s	1,465	500	2,8161	60 s	1,417	500	0,6899
10 min.			0,8236	10 min.			0,3188	10 min.			0,7950	10 min.			0,2394
VP3 - vzorek 3				VF3 - vzorek 3				VČ3 - vzorek 3				VM3 - vzorek 3			
Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]	Čas	h	U _{ss} [V]	I _{ss} [pA]
15 s			4,4069	15 s			1,1002	15 s			5,1346	15 s			1,3346
60 s	1,347	500	2,0690	60 s	1,256	500	0,5001	60 s	1,466	500	1,9735	60 s	1,351	500	0,5379
10 min.			0,6949	10 min.			0,1724	10 min.			0,4415	10 min.			0,1642

Z naměřených hodnot jsou dále stanoveny střední hodnoty k dalšímu výpočtu, ze kterých je následně spočtena průměrná vnitřní rezistivita teplotně zatěžovaných vzorků.

Průměr měrné elektrody u použitého můstku pro měření pomocí voltampérové metody je 5 cm a tedy po výpočtu efektivní plochy měrné elektrody z tohoto průměru umožňuje následný výpočet vnitřní rezistivity měřených vzorků.



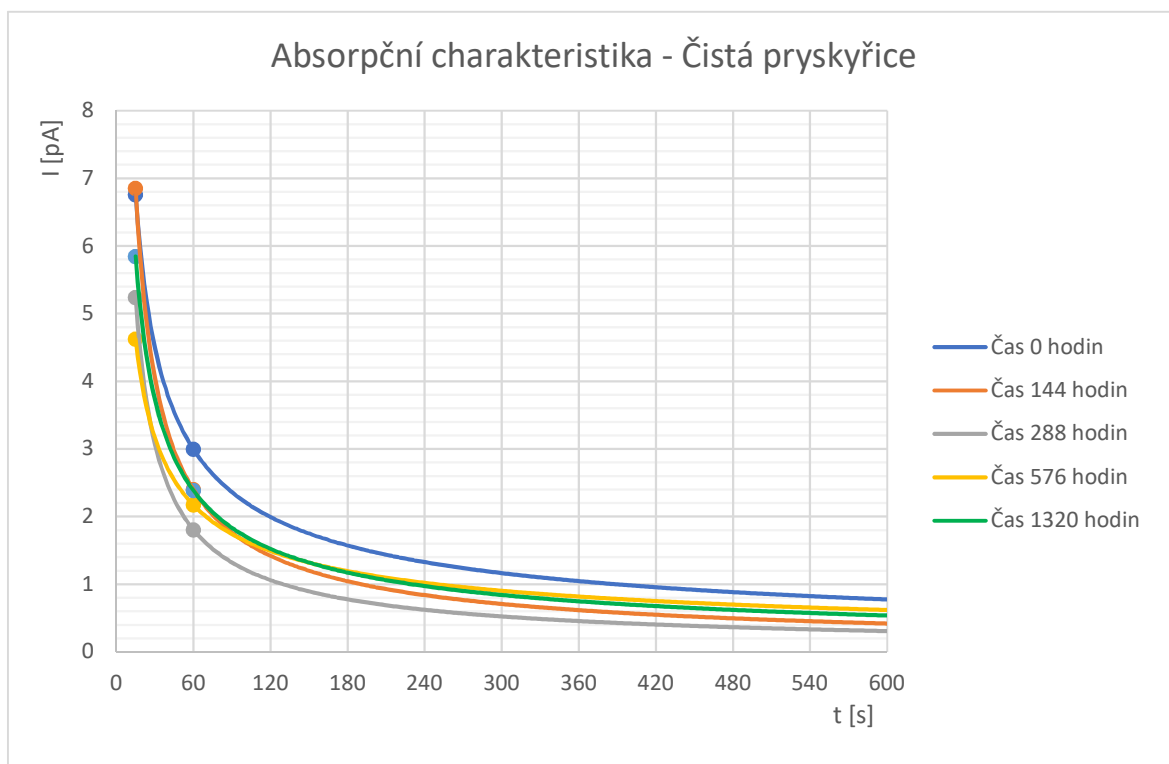
Obrázek 18: Průběh změny vnitřní rezistivity měřených vzorků v závislosti na čase stráveném pod teplotním zatížením

Z průběhu grafu je patrné, že nejmenší vnitřní rezistivitu vykazují vzorky bez plniva obsahující pouze čistou pryskyřici. Zároveň tak dochází k její nejmenší změně. Naopak nejlepší průběh s největší a zároveň nejvíce stabilní velikostí vnitřní rezistivity vykazují vzorky s fólií. Do těchto vzorků však může být vnesena mírná chyba měření vzhledem k pokroucení vzorků při tepelném zatížení, kdy nedochází k přesnému pokrytí celé plochy měřenou elektrodou.

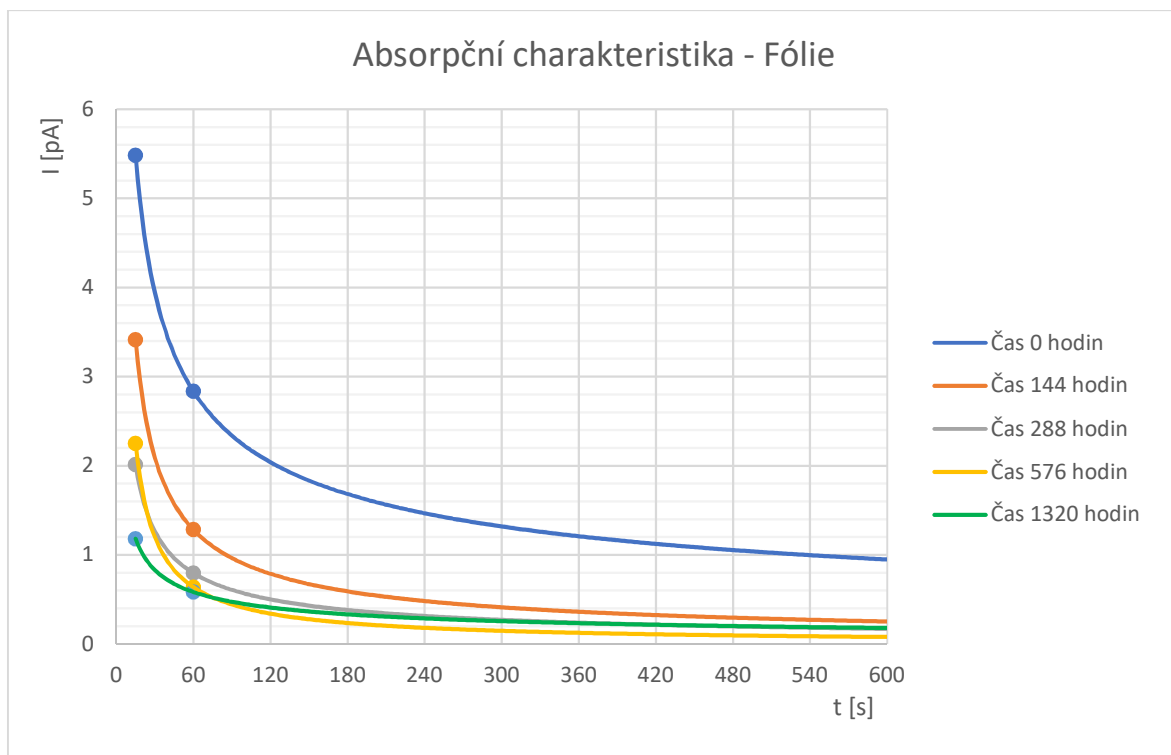
4.1.2 Absorpční charakteristiky jednotlivých vzorků

Jak již bylo řečeno výše, tak polarizační indexy se využívají k popisu stavu materiálu, kde je změřen vliv absorpčního proudu v závislosti na čase. Z průměrných hodnot jednotlivých vzorků je vypočten průběh absorpčního proudu odečtený v patnácté a šedesáté sekundě po přiložení stejnosměrného napětí na vzorek.

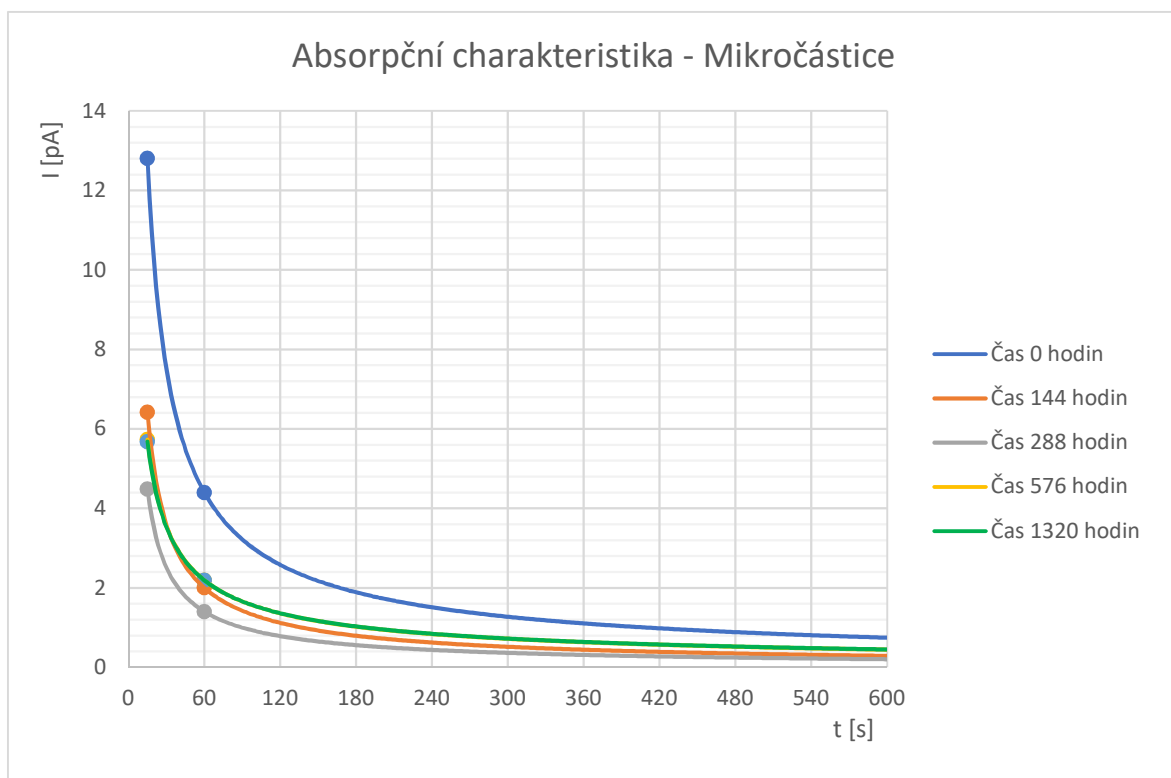
Průběh absorpčních charakteristik vychází nejlépe pro vzorky s fólií, kde dochází k průchodu nejmenšího proudu, naopak nejhůře u vzorků s čistou pryskyřicí bez plniva, kde dochází k největším změnám a největšímu průchodu proudu vzorkem.



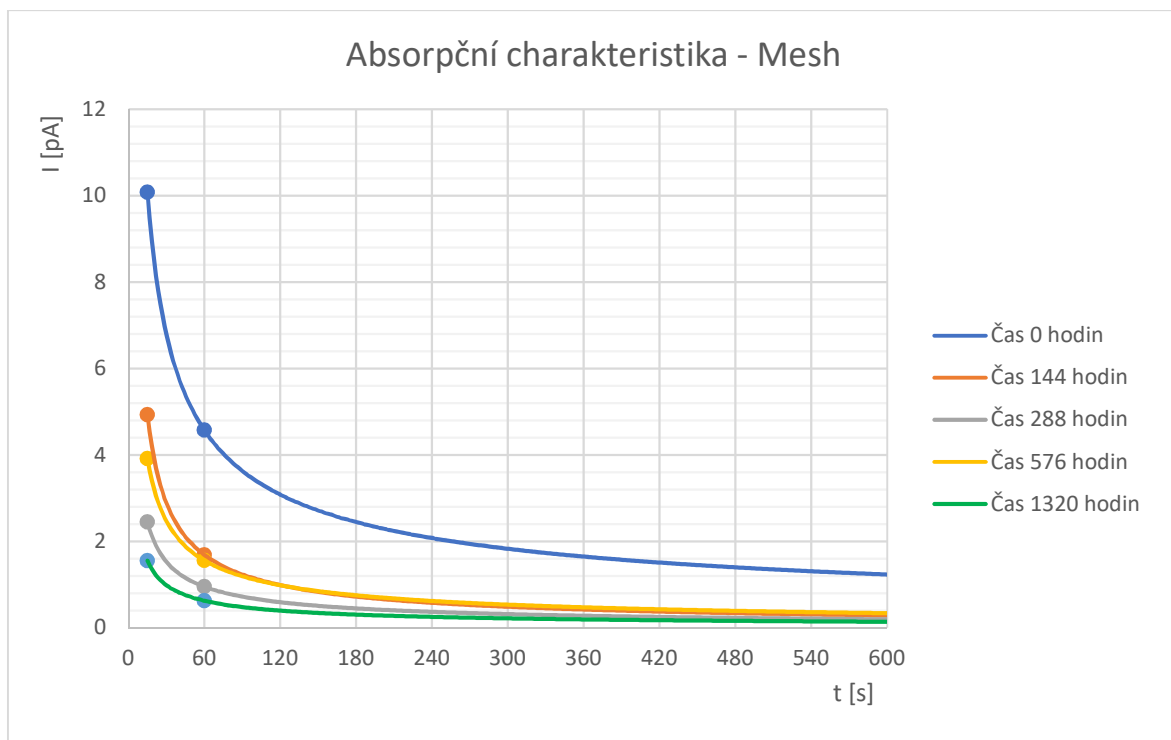
Obrázek 19: Průběh absorpčních charakteristik měřených vzorků s čistou pryskyřicí bez plniva



Obrázek 20: Průběh absorpčních charakteristik měřených vzorků s fólií



Obrázek 21: Průběh absorpčních charakteristik měřených vzorků s pryskyřicí



Obrázek 22: Průběh absorpčních charakteristik měřených vzorků s mesh

Z pohledu polarizačních indexů pro jednotlivé vzorky v závislosti na zatížení vychází výsledky viz. Tabulka 7.

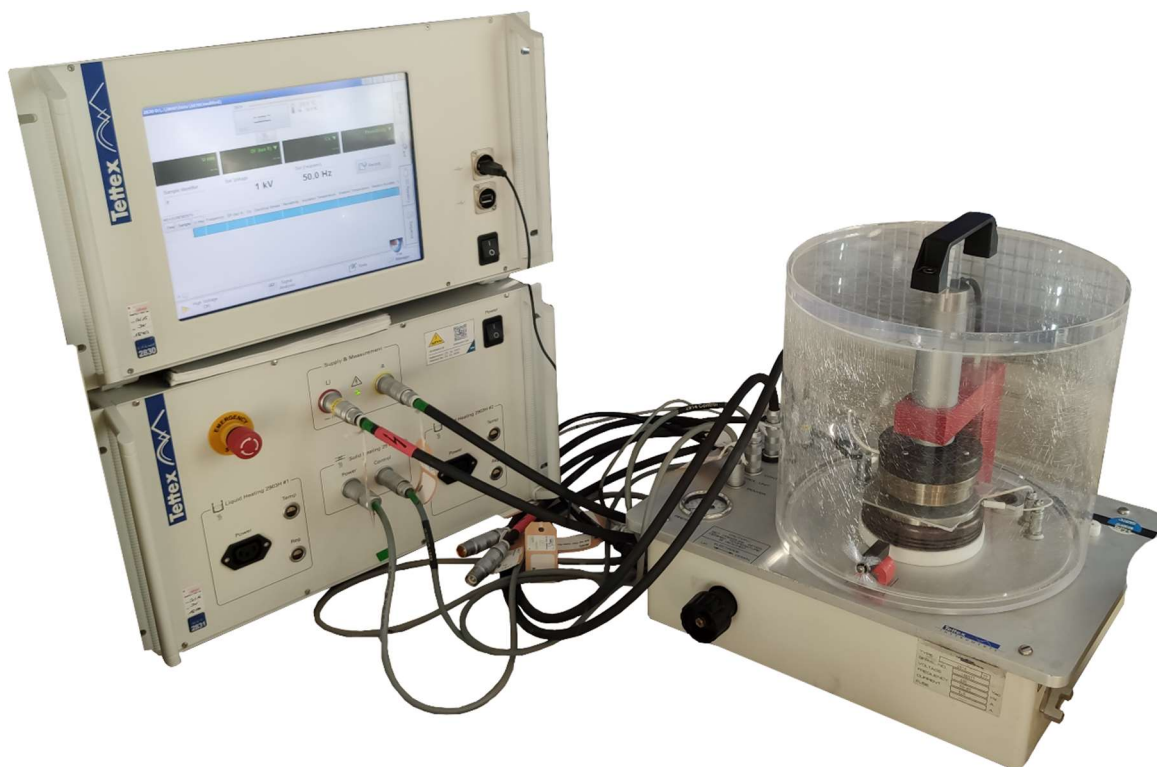
Tabulka 9: Polarizační indexy jednotlivých vzorků

Tepelné zatížení [h]	Hodnota polarizačního indexu			
	Čistá pryskyřice	Fólie	Mikročástice	Mesh
0	2,256	1,934	2,911	2,204
144	2,857	2,662	3,209	2,924
288	2,900	2,530	3,196	2,584
576	2,128	3,524	2,614	2,514
1320	2,451	2,028	2,594	2,486

Z výsledků polarizačních indexů je patrné, že vykazovaly kvalitu nejlepšího izolantu vzorky s mikročásticemi, jejíž poměrové hodnoty se pod tepelným zatížením drží nejvyšších hodnot. Naopak vzorky s plnivem „mesh“ si drží nejstabilnější hodnoty a lze tak u nich nejlépe odhadovat další výsledky ovlivněné procesem stárnutí teplotou.

5 Měření dielektrických ztrát

Pro měření dielektrických ztrát elektroizolačního materiálu byl použit automatický můstek, který je součástí měřicího přístroje Haefely 2830. Měřený vzorek je umístěn do testovací buňky, kde je pod určitým tlakem, konkrétně 6 N/cm^2 upevněn mezi dvěma elektrodami. Výstupem měření je již vypočítaná kapacita vzorku C_x , relativní permitivita ϵ a ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Měření je prováděno s přiloženým střídavým napětím 1 kV o frekvenci 50 Hz a současně je vzorek mezi elektrodami zahříván na teplotu 30°C .



Obrázek 23: Měřicí přístroj Haefely 2830 s testovací buňkou

Níže vypsané tabulky ukazují naměřené hodnoty při jednotlivých měření. Hodnoty v jednotlivých tabulkách jsou průměrovány pro každý vzorek s jiným typem plniva. Před každým měřením nejprve došlo k úplnému vybití vzorku od statické elektřiny za pomoci zatížení testovacího vzorku stejnosměrný proudem o velikosti 1000 V po dobu třiceti sekund.

Tabulka 10: První měření dielektrických ztrát

Plnivo	Měření: 1 - 7.12.2019			Doba v troubě: 0 hodin		
	Stř. napětí [V]	Frekvence [Hz]	DF (tan δ)	Cx [pF]	Permitivita	Teplota [°C]
Čistá pryskyřice	1000	50	0,0091	44,6100	3,5740	30
Mesh			0,0095	44,0167	3,5267	
Fólie			0,0072	34,7067	2,7807	
Micročástice			0,0104	40,7167	3,2623	

Tabulka 11: Druhé měření dielektrických ztrát

Plnivo	Měření: 2 - 7.12.2019			Doba v troubě: 144 hodin		
	Stř. napětí [V]	Frekvence [Hz]	DF (tan δ)	Cx [pF]	Permitivita	Teplota [°C]
Čistá pryskyřice	1000	50	0,0050	42,6267	3,4150	30
Mesh			0,0056	41,4600	3,3217	
Fólie			0,0039	32,7533	2,6237	
Micročástice			0,0054	38,8067	3,1087	

Tabulka 12: Třetí měření dielektrických ztrát

Plnivo	Měření: 3 - 7.12.2019			Doba v troubě: 288 hodin		
	Stř. napětí [V]	Frekvence [Hz]	DF (tan δ)	Cx [pF]	Permitivita	Teplota [°C]
Čistá pryskyřice	1000	50	0,0046	43,0433	3,4483	30
Mesh			0,0050	41,4667	3,2220	
Fólie			0,0037	31,6100	2,5323	
Micročástice			0,0049	38,8167	3,1097	

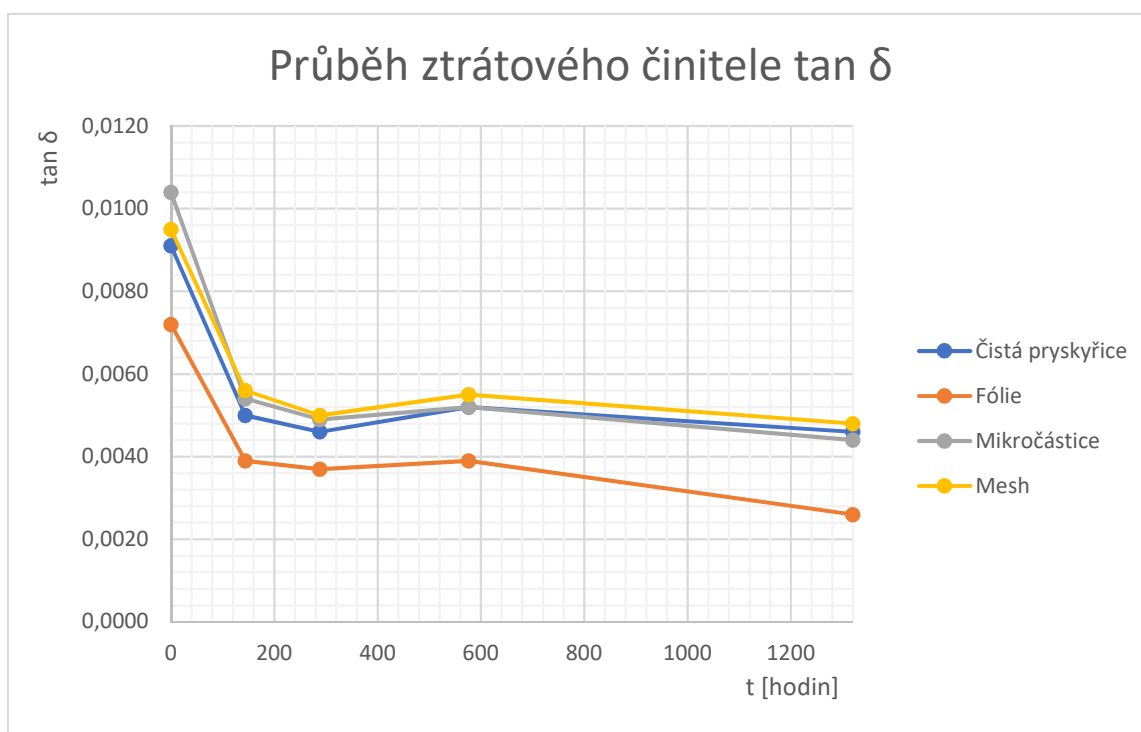
Tabulka 13: Čtvrté měření dielektrických ztrát

Plnivo	Měření: 4 - 7.12.2019			Doba v troubě: 576 hodin		
	Stř. napětí [V]	Frekvence [Hz]	DF (tan δ)	Cx [pF]	Permitivita	Teplota [°C]
Čistá pryskyřice	1000	50	0,0052	43,0800	3,4510	30
Mesh			0,0055	41,4233	3,3187	
Fólie			0,0039	31,2267	2,5020	
Micročástice			0,0052	39,0367	3,1273	

Tabulka 14: Páté měření dielektrických ztrát

Plnivo	Měření: 5- 7.12.2019			Doba v troubě: 1320 hodin		
	Stř. napětí [V]	Frekvence [Hz]	DF (tan δ)	Cx [pF]	Permitivita	Teplota [°C]
Čistá pryskyřice	1000	50	0,0046	42,7767	3,4270	30
Mesh			0,0048	39,9667	3,2017	
Fólie			0,0026	22,9133	1,8360	
Micročástice			0,0044	38,3800	3,0747	

Následující graf zobrazuje u jednotlivých vzorků závislost ztrátového činitele tan δ v závislosti na čase.

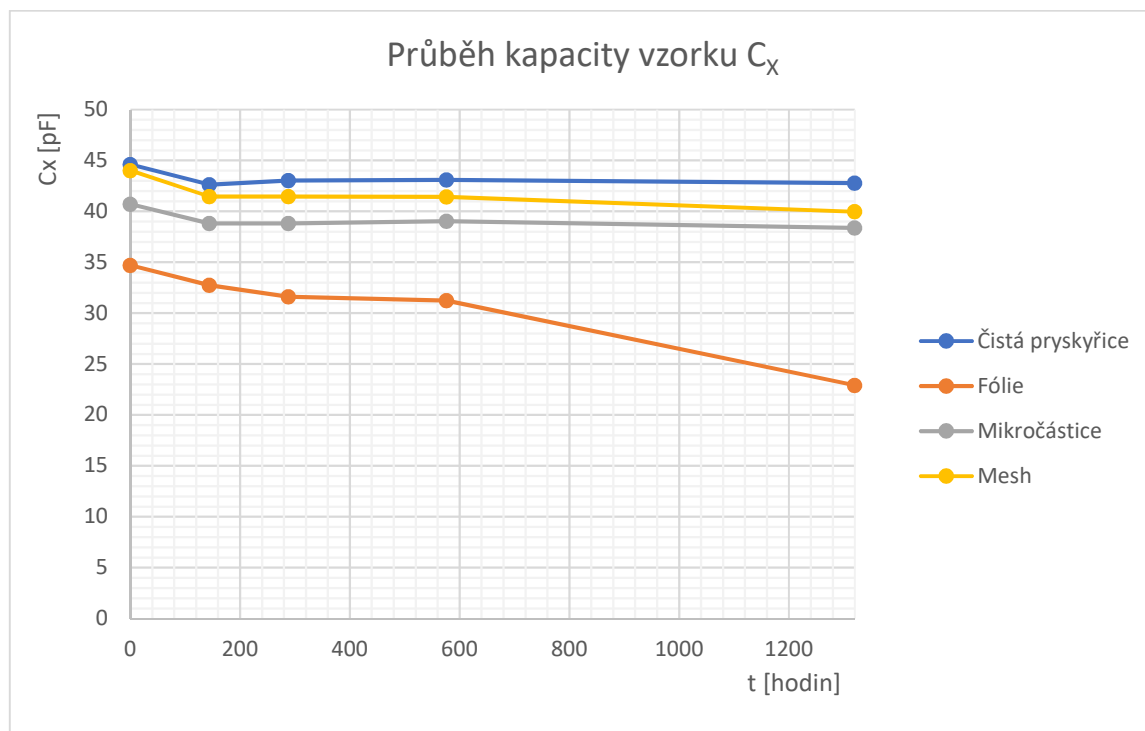


Obrázek 24: Změna ztrátového činitele měřených vzorků v závislosti na tepelném zatížení

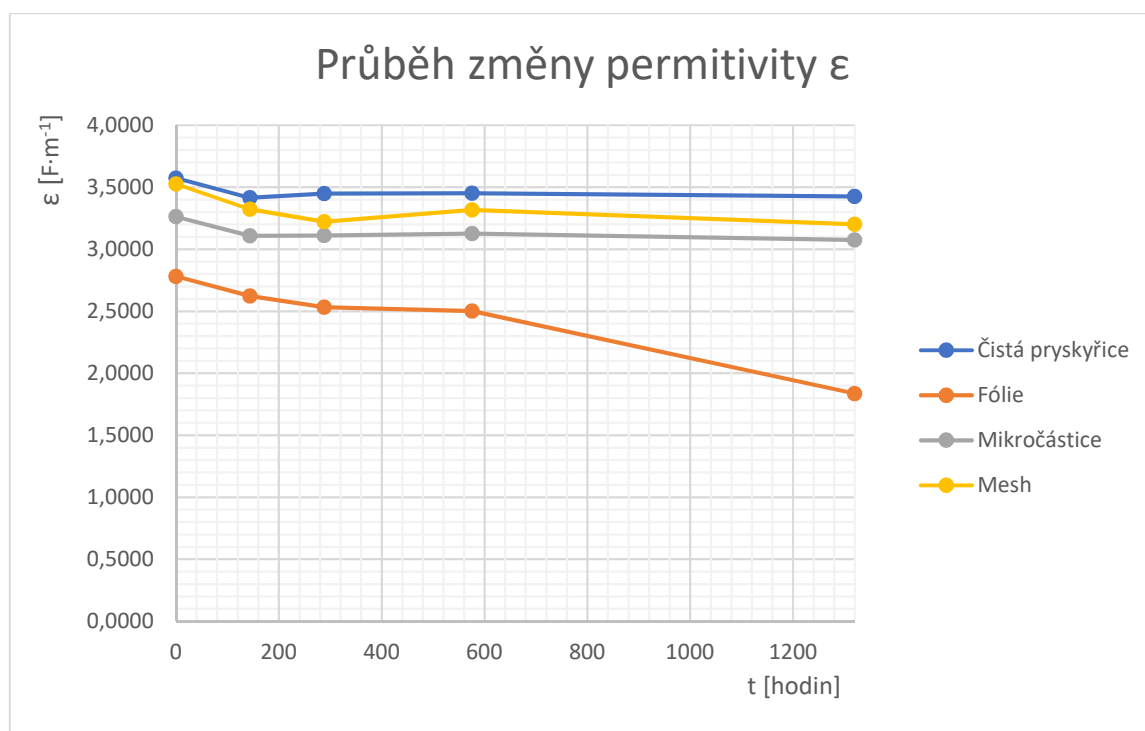
Z výsledného grafu je patrné, že jsou jednotlivé vzorky s jiným typem plniva velmi podobné. Větší rozdíl je vidět u vzorků s fólií jakožto plnivem, který je pravděpodobně způsobený postupným kroucením vzorku v závislosti na době strávené pod tepelným zatížením. To že nejsou vidět žádné velké rozdíly mezi jednotlivými typy plniv je důsledkem stálosti teploty, které byly vzorky po celou dobu testování vystavovány a také nepříliš dlouhou dobu samotného testování. V neposlední řadě je to také dáno tím, že veškerá užitá plniva jsou vyrobena z materiálu PA6. Z tohoto důvodu nelze určit žádný trend, který by mohl naznačovat konec živostnosti v čase. Přesto při lineárním trendu lze stanovit, že

nejlepší průběh $\tan \delta$ mají vzorky bez plniva, pouze s čistou pryskyřicí, kde dochází během tepelného zatížení k jeho nejmenším změnám. U vzorků s plnivem mají nejlepší průběh vzorky s plnivem typu mesh.

Grafy znázorňující průběhy kapacity vzorků C_x a relativní permitivity ϵ jsou si velice podobné a vzhledem k jejich minimálním změnám platí stejné opodstatnění jako u měření ztrátového činitele.



Obrázek 25: Změna kapacity měřených vzorků v závislosti na tepelném zatížení



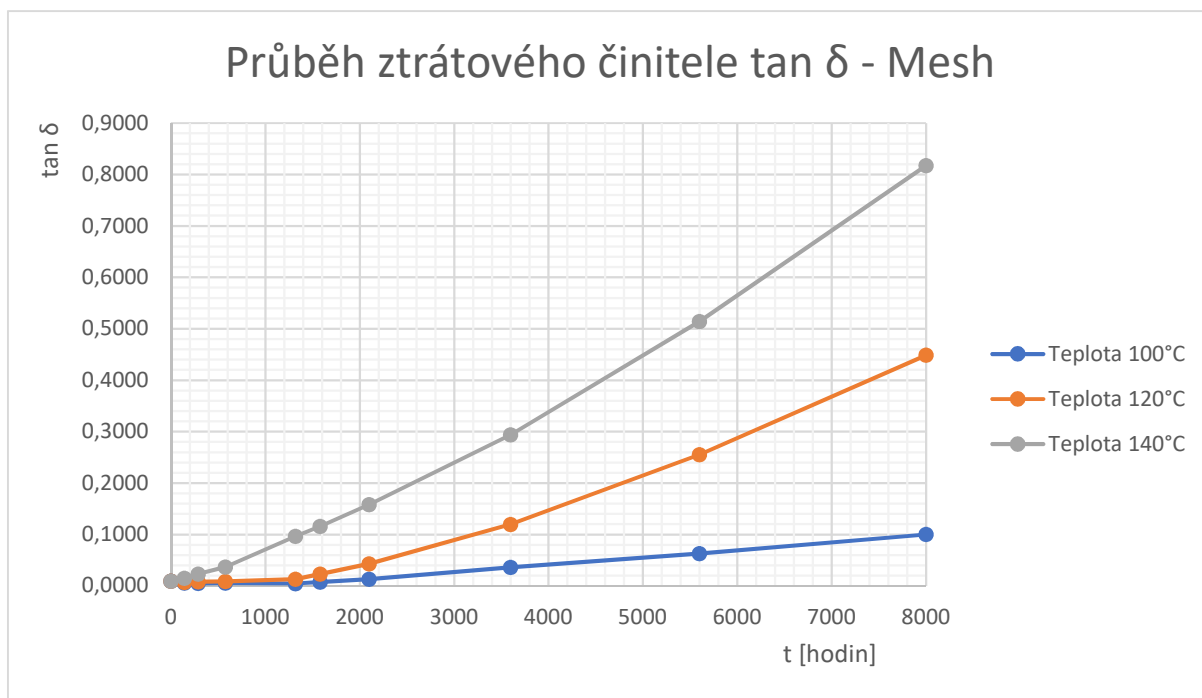
Obrázek 26: Změna permitivity měřených vzorků v závislosti na tepelném zatížení

5.1 Model životnosti a životnostní křivka

Pro stanovení životnosti nejen elektroizolačního materiálu se používá životnostní křivka. Životnostní křivka nám určuje zrychlený model poukazující na možné stárnutí materiálu v průběhu času a dává nám možnost rychle vypočítat ve které části doby životnosti se daný materiál nachází a jakým způsobem stárne. Pro stanovení životnostní křivky je potřeba nechat materiál stárnout vícero teplotami, aby bylo možné určit koeficient stárnutí. Výsledků a stanovení modelu životnosti není možné dosáhnout pouhými výpočty, a tak je měření nezbytně nutné. Materiál nestárne lineárně, avšak nelineárně reaguje na různé aspekty, například teplotu, a tak samotný odhad je velice obtížný. Model životnosti je možné vytvořit na kterékoliv z vlastností daného materiálu v závislosti na parametru, který se během provádění měření měnil. Následný model bude vytvořen v závislosti změny ztrátového činitele $\tan \delta$ na teplotě.

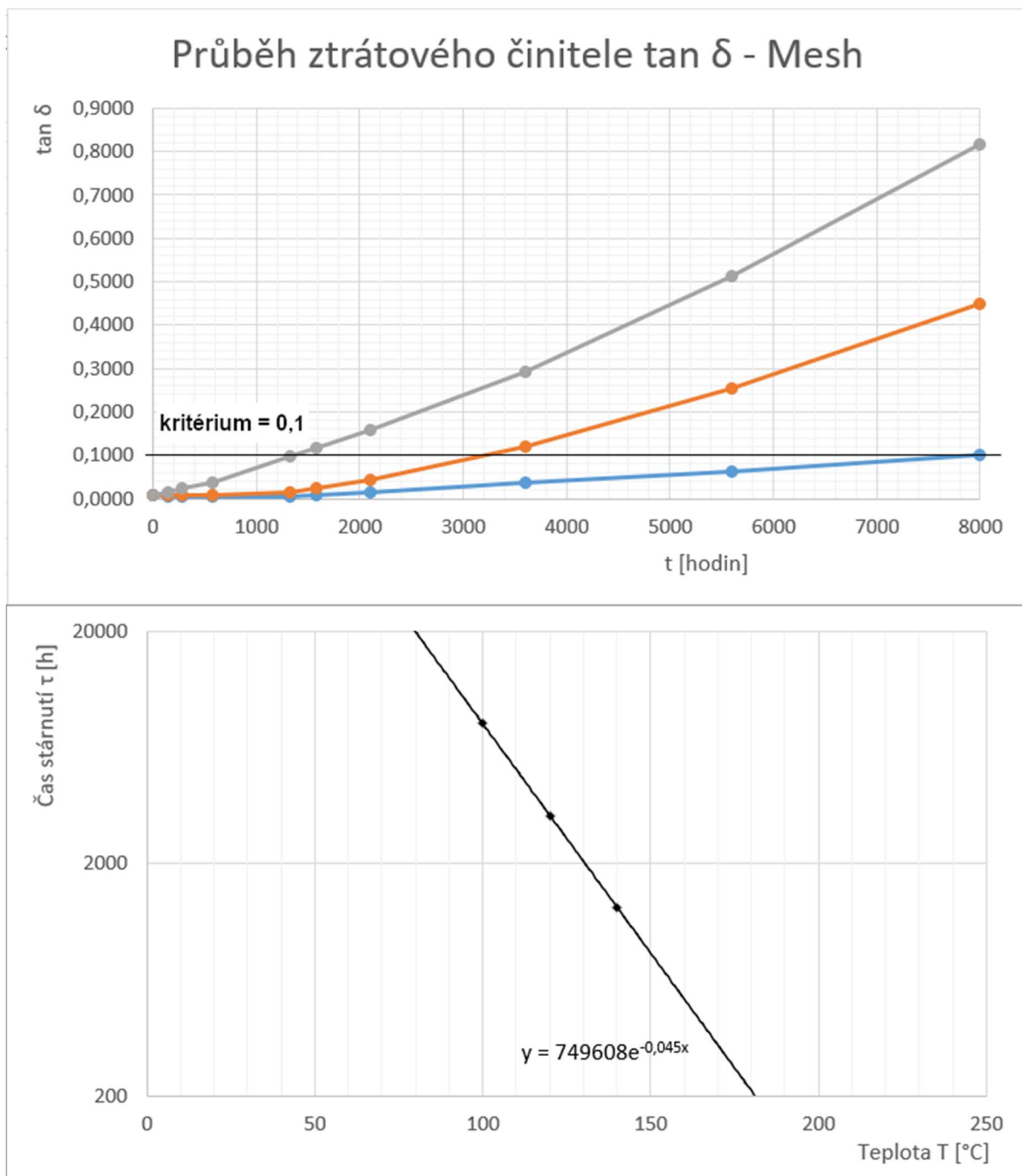
Během měření experimentu docházelo po celou dobu k vytvrzování materiálu, a tedy ke zlepšování jeho vlastností. Vzhledem k této skutečnosti bylo potřeba naměřené hodnoty nadále odhadnout a uměle protáhnout dobu stárnutí materiálu v troubě. Dále bylo potřeba odhadnout další dvě teploty při kterých by daný materiál stárnul. Zvolené teploty pro stárnutí

jsou 100°C, 120°C a 140°C. Postup a tvorba modelu životnosti je prováděna na materiálu s plnivem „mesh“



Obrázek 27: Průběh ztrátového činitele pro materiál s plnivem "mesh" v závislosti při stárnutí na třech různých teplotách

Po změření daných hodnot je potřeba určit kritérium, při kterém již elektroizolační materiál nevykazuje vlastnosti dobrého izolantu. Pro elektrické izolanty se za dobrý izolant považují materiály s menším ztrátovým činitelem než 10^{-1} . Z tohoto důvodu bylo kritérium pro stanovení životnostní křivky zvoleno při ztrátovém činiteli $\tan \delta = 0,1$.



Obrázek 28: Stanovení životnostní křivky pro kompozitní materiál s plnivem "mesh"

Výsledkem životnostní křivky je exponenciální Montsingerovo model určující materiálové konstanty měřeného materiálu.

$$\tau = A \cdot e^{-BT} = 749608 \cdot e^{-0.045T} \text{ [h]} \quad (11)$$

A, B materiálové konstanty
 T teplota [°C]

Při delší době stárnutí nebo vyšších teplotách by životnostní křivka nebyla pouze lineární, ale v určitém momentu by došlo k tzv. lomu a prudkému zvýšení ztrátového činitele $\tan \delta$. Pro výpočet stárnutí lze použít i jiné vzorce, respektive modely pro výpočet. Příkladem může být třeba Arrheniův model stárnutí, který lze využít i pro stanovení aktivační energie.

Určená životnostní křivka slouží jako příkladná pro postup výpočtu životnosti elektroizolačního materiálu, než dosáhne hodnot ztrátového činitele $\tan \delta > 0,1$ jakožto hraniční hodnota pro dobrý izolant. Výstupem životnostní křivky jsou takzvané materiálové konstanty, které po dosazení do zvoleného Montsingerova modelu umožňují výpočet doby stárnutí pro zvolenou teplotu. Hodnoty nejsou zcela přesné z důvodu odhadování měřených hodnot při dalších dvou teplotách, na kterých nebyl experiment reálně prováděn. Při zvolení provozní teploty například 40°C lze model jednoduše použít a zjistit tak dobu při které elektroizolační materiál dosáhne hraničních hodnot ztrátového činitele.

$$\tau = A \cdot e^{-B} = 749608 \cdot e^{-0,045 \cdot 40} \doteq 123909 \text{ h} \quad (12)$$

Při stále teplotě 40° by tak při určených materiálových konstantách elektroizolační materiál zestárnul za 14 let. Při užití reálných hodnot by takový materiál stárnul desítky až stovky let.

6 Závěr

Výroba samostatných elektroizolačních vzorků byla započata v říjnu 2019 a vzhledem ke komplikacím proběhlo první měření až počátkem prosince. Celkem bylo vyrobeno 12 vzorků se třemi různými typy plniva a jeden kompozit zcela bez plniva. Jednalo se o vzorky s plnivem z materiálu PA6 typu mikročástice, mesh a fólie. Během výroby vzorků nastaly komplikace se špatnou aplikací plniva, zejména u typu s fólií, kde při vytvrzování došlo k jejich znehodnocení. Tyto vzorky pak bylo potřeba vyrobit znovu. První měření proběhlo 7 prosince, kdy byly vzorky 24 hodin předtím připojené přes ocelové plíšky na zem, aby se zcela zbavily povrchového náboje. Následně byly vystaveny teplotnímu stárnutí o teplotě 100°C ve speciální troubě.

Nejdříve byla změřena vnitřní a povrchová rezistivita za pomoci voltampérové metody a poté kapacita, relativní permitivita a ztrátový činitel na speciálním přístroji určeném pro měření dielektrických ztrát. Na vzorcích bylo postupně provedeno další měření po 144, 288, 576 a 1320 hodinách. Naneštěstí zvolená teplota 100°C nebyla dostatečná pro stanovení zrychleného stárnutí vzorků a tak je možné sledovat spíše postupné vytvrzování a zlepšování vlastností kompozitu. Z tohoto důvodu je další postup stárnutí možný pouze odhadovat, protože vzhledem ke vzniklé situaci s koronavirem nebylo možné provádět další měření, které by umožnilo stárnutí lépe stanovit. Zejména u vzorků s fólií postupně docházelo ke zvýšené nepřesnosti měření z důvodu jejího kroucení při dlouhodobém vystavení zvolené teplotě, což mělo za následek špatné přilehnutí měřících elektrod na vzorek po celé jejich ploše.

Z naměřených výsledků se vzorky obsahující různé typy plniva včetně vzorků neobsahující žádné plnivo lze tedy dojit tedy pouze k odhadům. Pro přesnější stanovení by byla potřeba delší doba pod tepelným zatížením a také vyšší teplota. Naměřené výsledky jsou si tak velice podobné. Z pohledu absorpčních proudů lze odhadovat, že k nejlepším výsledkům dospěly vzorky s fólií, jakožto plnivem. U těchto vzorků dochází k nejmenšímu průchodu proudu. Naopak vzorky obsahující pouze samotnou pryskyřici bez plniva dosahují největších změn proudu po kontaktu s napětím a stávají se tak nejhoršími. Poměr změn proudu po připojení vzorků na napětí vychází nejlépe u kompozitu s mikročásticemi a plnivem typu mesh. Jako poslední k vyhodnocení zbývá průběh ztrátového činitele a kapacity vzorku, kde k nejlepším výsledkům dospěly překvapivě vzorky bez plniva s čistou

pryskyřicí z důvodu nejmenších změn. U vzorků s plnivem dosahující nejlepších výsledků vzorky s plnivem typu mesh. Vyrobené vzorky s fólií bylo potřeba při vyhodnocení brát s rezervou, protože při stárnutí docházelo ke kroucení fólie a tím ke špatnému dosedání elektrod na povrch měřeného kompozitu. Z tohoto důvodu jsou výsledky značně zkreslené.

Odhadnutí stárnutí není jednoduché z důvodu exponenciálního chování. Lidský mozek přemýšlí lineárně, a tak bych chtěl odhadem pouze poukázat na postup, který lze aplikovat i při přesně změřených hodnotách. Existuje mnoho modelů, které lze pro stanovení stárnutí použít. Z důvodu jednoduchosti jsem použil montsingerovův model, u kterého lze po logaritmickém proložení výsledků životnostní křivkou získat materiálové konstanty. Získané konstanty pak stačí dosadit do montsingerovo vzorce a tím stanovit libovolný čas dosažení ztráty izolační schopnosti materiálu při určité teplotě.

Měření stárnutí izolačních materiálů je stále díky své časové náročnosti neprobádaným tématem, které je simulováno zrychlenými modely. Nelze tedy zcela přesně určit vlastnosti materiálu vystaveného nějakému zatížení i stovky let. Při určování stárnutí materiálu také nehraje roli pouze teplota, ale další okolní vlivy, jakými jsou vlhkost, mechanické, či elektrické namáhání. Z toho důvodu se pro přesnější určování stárnutí využívá takzvaných kombinovaných modelů, které dokážou lépe předpovědět odhad více se přibližující samotné realitě.

- [1] DRÁPALA JAROMÍR, KURSA Miroslav. Elektrotechnické materiály, učební texty. *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava* [online]. 2012. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [2] BRANŠOVSKÝ MARTIN. Životnost a spolehlivost materiálů v elektrotechnice. *Západočeská univerzita v Plzni fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie*. 2012.
- [3] MENTLÍK, VÁCLAV. *Dielektrické prvky a systémy*. B.m.: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [4] DINEL S.R.O. Tabulka relativních permitivit vybraných materiálů. *Dinel, s.r.o. Zlín* [online]. nedatováno. Dostupné z: http://www.dinel.cz/_file/AMIfv95QsvMopq8GA848o69r_yFAVYgklqLiAoLME0ORLQPdCAIkRAeJvDDR90Oqh8kq6T4bVT6dASBZ27h_lIuHiZ3j-GhH8T6DphAz1Ui4CwS-441Bupe_IVYYHw_XkUqAHRt6U93WEiawC8m6jG7tzF1ptcn0sQ/relativni-permitivity-cz_n1.pdf
- [5] ČIČMANEC, PAVOL. Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetismus. *Alfa a SNTL, Bratislava*. 1980.
- [6] TRNKA, PAVEL. Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů [online]. 2007. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/394/1/r0c1c2.pdf>
- [7] PAVEL, TRNKA. Zbytková životnost elektroizolačních systémů. *Elektrorevue-časopis pro elektrotechniku* [online]. 2009. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/35/zbytkova-zivotnost-elektroizolacnich-systemu/>
- [8] DAVID JOHNS, Andra Hutton UC Davis Undergraduate. The Arrhenius Law: Arrhenius Plots [online]. 2019. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Kine](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kine)

- tics/Modeling_Reaction_Kinetics/Temperature_Dependence_of_Reaction_Rates/The_Arrhenius_Law/The_Arrhenius
- [9] POLANSKÝ, RADEK. Tepelné stárnutí elektroizolačních kapalin. *Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická* [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/85/tepelne-starnuti-elektroizolacnich-kapalin/>
- [10] ČSN EN 60085 ed. 2, Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení. 2008.
- [11] MENTLÍK VÁCLAV, PITHERA JOSEF, POLANSKÝ RADEK, PROSR PAVEL, TRNKA PAVEL. *Diagnostika elektrických zařízení*. B.m.: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [12] HASSDENTEUFEL, JOSEF. *Elektrotechnické materiály*. B.m.: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1967. ISBN 04-540-67.
- [13] SMETANA, JAROLAV. Měření vybraných parametrů izolace. *Blue Panther Instruments* [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39496.pdf>
- [14] ŠTAJNER, DAVID. Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku. *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií*. 2014.
- [15] DUCHÁČEK, VRATISLAV. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. B.m.: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [16] ELAN-TECH. Epoxy Resins and Structural [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjyycK3IbqAhUUnVwKHYwTD-0QFjAAegQIARAB&url=http%3A%2F%2Fwww.3ttt.at%2Fapp%2Fdownload%2F5808373585%2FElan-tech%2BING-IT%2BComposites%2B%2BAdhesives%2B2010%2B->

%2B29_03_10.pdf&usg=AOvVaw1fpOjk8SSxCswlCw01Dbue

- [17] EHRENSTEIN, GOTTFRIED W. *Polymerní kompozitní materiály*. B.m.: Scientia Praha, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [18] PA6 – Ertalon, Tecamid, Sustamid. *VM Plast s.r.o.* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.polyamidy.cz/pa6/>
- [19] YUEQING SAILAOQI GAUZE FILTER CO. Yueqing SaiLaoQi Gauze filter [online]. nedatováno. Dostupné z: http://www.sailaoqi.com/products_list/pmcId=63.htm

Příloha A: Katalogové listy



TECHNICAL DATA SHEET

Product: ELAN-TECH EC 141 / W 242 NF

Application: Lamination, Transparent encapsulation.

Processing: Brush application or by rolling. Manual casting, Under vacuum casting. Manual and/or automatic casting. Room temperature curing. Maximum recommended thickness 10mm.

Mixing Ratio: 100:45

Description / Application:

Two component epoxy system. Colourless, transparent. The system is based on a low viscosity unfilled resin and an amine hardener. Long pot-life. Low exothermic peak allow the casting of quite large objects. It is necessary to check, based on applications, if the system is suitable for the preparation of casted transparent objects where different materials are coupled together. Good resistance towards UV. The exposure to UV for long time causes nevertheless a yellowing of the material. The system is RoHS compliant (European directive 2002/95/EC).

SYSTEM SPECIFICATIONS					
RESIN					
Viscosity at:	25° C	IO-10-50 (EN13702-2)	mPas	650	950
HARDENER					
Viscosity at:	25° C	IO-10-50 (EN13702-2)	mPas	250	350

TYPICAL SYSTEM CHARACTERISTICS						
Processing data						
Resin colour		Colourless				
Hardener colour		Colourless				
Mixing ratio by weight		for 100g resin	g	100:45		
Mixing ratio by volume		for 100ml resin	ml	100:50		
Density	25°C Resin	IO-10-51 (ASTM D 1475)	g/ml	1,10	1,14	
Density	25°C Hardener	IO-10-51 (ASTM D 1475)	g/ml	0,98	1,02	
Pot life	25°C (40mm;10ml)	IO-10-53 (*)	min	55	65	
Exothermic Peak	25°C (40mm;10ml)	IO-10-53 (*)	°C	130	150	
Initial mixture viscosity	25°C	IO-10-50 (EN13702-2)	mPas	400	600	
Gelation time	25°C (15ml;6ml)/(100ml)	IO-10-73 (*)	h	50min/4h	70min/5h	

Technical information and recommendations in this document are based on tests believed to be reliable but their accuracy and completeness are not guaranteed. User shall determine suitability for particular purpose and shall assume all risk herewith.



28021 Madrid (SPAIN)
C/Laguna del Marquesado 36A

Telf: +34 911 260
info@tf3p.com



Demoulding time	25°C (15m);6m)	(*)	h	18	24
Post-curing	60°C	(*)(*)	h		(15)
Maximum recommended thickness			mm		10

TYPICAL CURED SYSTEM CHARACTERISTICS					
Properties determined on specimens cured: 24 h TA + 15 h 60°C					
Colour					Colourless
Density	25°	IO-10-54 (ASTM D 792)	g/ml	1,08	1,12
Hardness	25°	IO-10-58 (ASTM D 2240)	Shore/D15	80	85
Glass transition (Tg)		IO-10-69 (ASTM D 3418)	°C	52	58
Max operating temperature		(**)	°C		130
Flexural strength		IO-10-66 (ASTM D 790)	MN/m ²	69	78
Maximum strain		IO-10-66 (ASTM D 790)	%	3.5	5.5
Strain at break		IO-10-66 (ASTM D 790)	%	>	15
Flexural elastic modulus		IO-10-66 (ASTM D 790)	MN/m ²	2200	2700
Tensile Strength		IO-10-63 (ASTM D 638)	MN/m ²	38	47
Elongation at Break		IO-10-63 (ASTM D 638)	%	9	13

IO-00-00 = Elantas Italia's test method. The correspondent international method is indicated whenever possible.

nd = not determined na = not applicable RT = TA = laboratory room temperature (23±2°C)

Conversion units: 1 mPas = 1 cPs 1MN/m² = 10 kg/cm² = 1 MPa

(*) for larger quantities pot life is shorter and exothermic peak increases

(**) the brackets mean optionality

(***) The maximum operating temperature is given on the basis of laboratory information available being it function of the curing conditions used and of the type of coupled materials.

For further possible information see post-curing paragraph.

Instructions: Add the appropriate quantity of hardener to the resin, mix carefully. Avoid air trapping. For some applications it can be useful to pre-heat the components and/or carry out a de-aeration step under vacuum of the mixture before casting.

Curing / Post-curing: For a room temperature curing system post-curing allows fast stabilization of the material and obtainment of the best electrical and mechanical properties. During the curing process it is advisable to avoid thermal variations higher than 10°C/hour

Storage: Epoxy resins and their hardeners can be stored for two years in the original sealed containers stored in a cool, dry place.

Technical information and recommendations in this document are based on tests believed to be reliable but their accuracy and completeness are not guaranteed. User shall determine suitability for particular purpose and shall assume all risk herewith.



28021 Madrid (SPAIN)
C/Laguna del Marquesado 36A

Telf: +34 911 260
info@tf3p.com



Handling precautions: Refer to the safety data sheet and comply with regulations relating to industrial health and waste disposal.

Special notice: The above are references values only. For specific information on the film's suitability for use in a particular application, contact TF3P technical support team for advice.

emission date: October 2010

revision n° 00

Technical information and recommendations in this document are based on tests believed to be reliable but their accuracy and completeness are not guaranteed. User shall determine suitability for particular purpose and shall assume all risk herewith.



28021 Madrid (SPAIN)

C/Laguna del Marquesado 36A

Telf: +34 911 260

info@tf3p.com